

ABSCHLUSSBERICHT

Weiterführende Untersuchungen zum Brandverhalten von gußeisernen Stützen

im Auftrag des
Ministeriums für Bauen und Wohnen
des Landes Nordrhein-Westfalen
Aktenzeichen: II B 5-72.02-208/91

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser

Dipl.-Ing. Peter Nause

Dr.-Ing. Annette Rohling

unter Mitwirkung von

Dr.-Ing. Thomas Dorn

Dr.-Ing. Osama El-Nesr

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

30. April 1994

INHALT

	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	3
2 Ausgangssituation	3
2.1 Entwicklung von Gußeisenkonstruktionen	3
2.2 Bisherige Erkenntnisse	6
3 Tragverhalten gußeiserner Stützen bei Raumtemperatur	8
3.1 Geometrische Kennwerte	8
3.2 Mechanische Kennwerte	8
3.3 Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit	10
4 Hochtemperatur-Materialkennwerte von Gußeisen	11
4.1 Allgemeines	11
4.2 Wärmetechnische Kennwerte	12
4.3 Thermomechanische Kennwerte	15
5 Normbrandversuche mit gußeisernen Stützen	15
5.1 Brandversuchsstand und Versuchsaufbau	15
5.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	18
5.3 Versuchsergebnisse	21
6 Wertung der Versuchsergebnisse	23
7 Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall	26
7.1 Rechenverfahren	26
7.2 Vergleich von Versuch und Berechnung	27
8 Vereinfachtes Bemessungsverfahren für die Praxis	32
9 Zusammenfassung und Ausblick	35
10 Literaturhinweise	35

Anlagen

Anlage 1 bis 7	Querschnittswerte der Versuchsstützen (Ultraschall)
Anlage 8 bis 29	Zeitverläufe der Brandraum- und Bauteiltemperaturen bei den Brandversuchen
Anlage 30 bis 37	Zeitverläufe der Bauteilverformungen bei den Brandversuchen

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wurde in einer Reihe von kleineren Forschungsvorhaben [1 - 4] versucht, die Kenntnisse bezüglich des Brandverhaltens von Gußstützen zu erweitern und möglichst an den für Stahlbauteile erreichten Stand heranzuführen. Dazu wurden einerseits Brandversuche an Gußstützen mit bauteilgemäßen Abmessungen und andererseits Kleinversuche (Warmkriechversuche) zur Ermittlung temperaturabhängiger Werkstoffkennwerte durchgeführt. In den Brandversuchen wurden u.a. praxisnahe Ertüchtigungsmaßnahmen wie Betonverfüllung und Aufbringen von dämmschichtbildenden Brandschutzanstrichen untersucht.

Die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse wurde von der Bau Praxis mit großem Interesse aufgenommen, so daß ein weiteres Forschungsvorhaben zur Ergänzung und Absicherung der Versuchsergebnisse bewilligt wurde. Dabei sollten mit Hilfe von Normbrandversuchen das Brandverhalten alter Gußstützen nach einer praxisnahen Ertüchtigung mit einem dämmschichtbildenden Anstrich und bei einer gegenüber der Norm DIN 1051 erhöhten Auslastung nachgewiesen werden. Dank einer zusätzlichen finanziellen Unterstützung durch den Sonderforschungsbereich 315 "Erhaltung historisch bedeutsamer Bauwerke" konnten weiter Hochtemperatur-Materialuntersuchungen durchgeführt und daraus abgesicherte temperaturabhängige Werkstoffkennwerte als Rechengrundlagen für die rechnerische Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens von gußeisernen Stützen unter Brandeinwirkung [5] bereitgestellt werden.

2 AUSGANGSSITUATION

2.1 Entwicklung von Gußeisenkonstruktionen

Gußeisen fand aufgrund seiner Eigenschaften - gute Vergießbarkeit und Formgebungsmöglichkeit, geringe Korrosionsanfälligkeit und ho-

he Druckfestigkeit - zu Beginn des 18. Jahrhunderts vielfältige Verwendung. Es wurde im 18. und 19. Jahrhundert vorwiegend im Industriebau, insbesondere in Hallenbau, für Stützen und Bogenkonstruktionen angewendet. Bild 1 zeigt die vielfältigen Ausbildungsformen von Gußstützen.

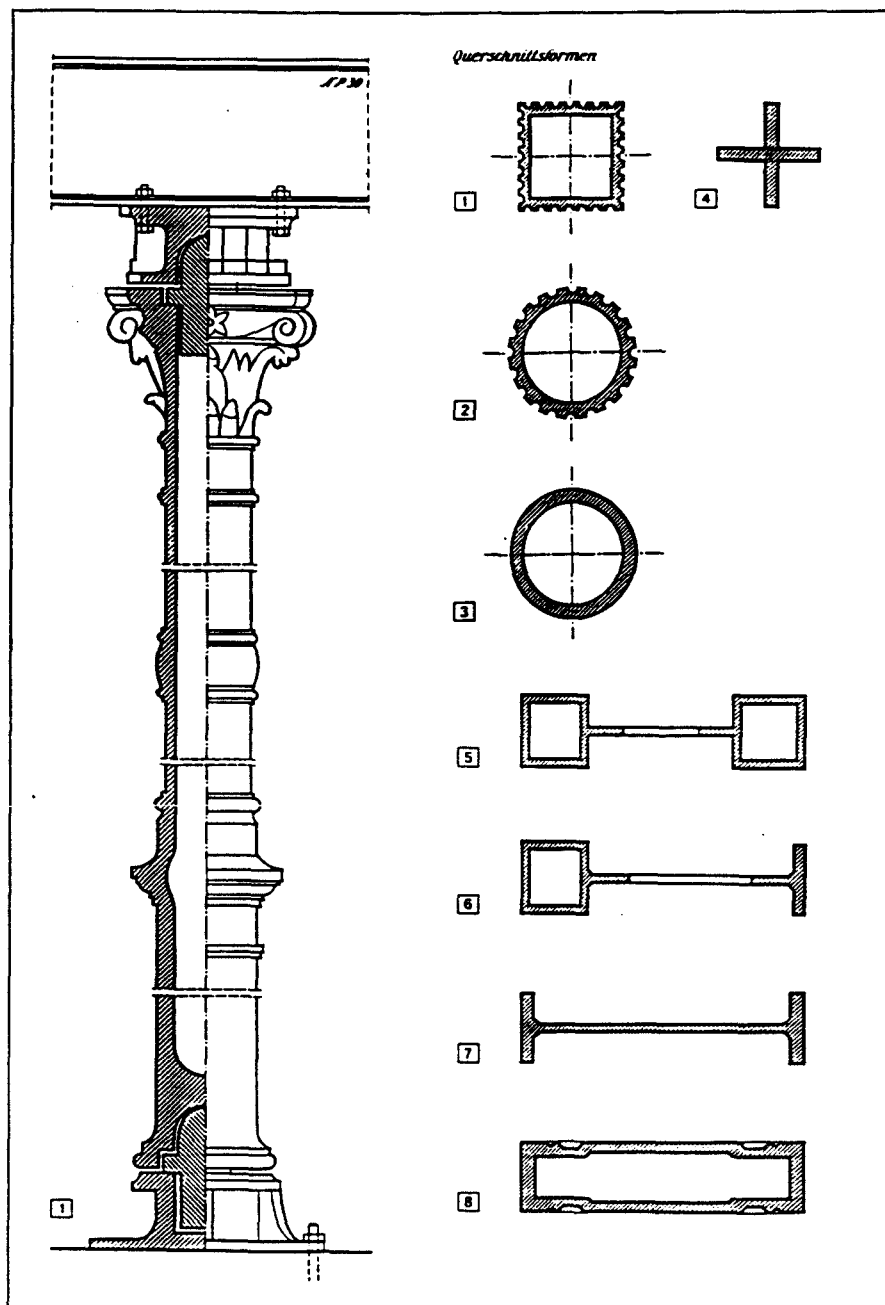


Bild 1 Gußeiserne Stützen, Querschnitte, Fuß- und Kopfausbildung, zusammengestellt aus [6]

Die Herstellung der vorwiegend als Hohlprofile verwendeten Gußstützen erfolgte in liegend angeordneten Gießformen, die sich aus einem oberen und unteren Gießkasten zusammensetzten. Für Hohlprofile wurde zentrisch ein Gießkern eingelegt, der jedoch infolge des unterschiedlichen spezifischen Gewichtes von Kernmaterial und Gußeisen aufschwamm und so zu einem Kernversatz führte. Dadurch erhielt die Hohlstütze in der unteren Kastenform eine größere Wanddicke als an der Oberseite (Bild 2).

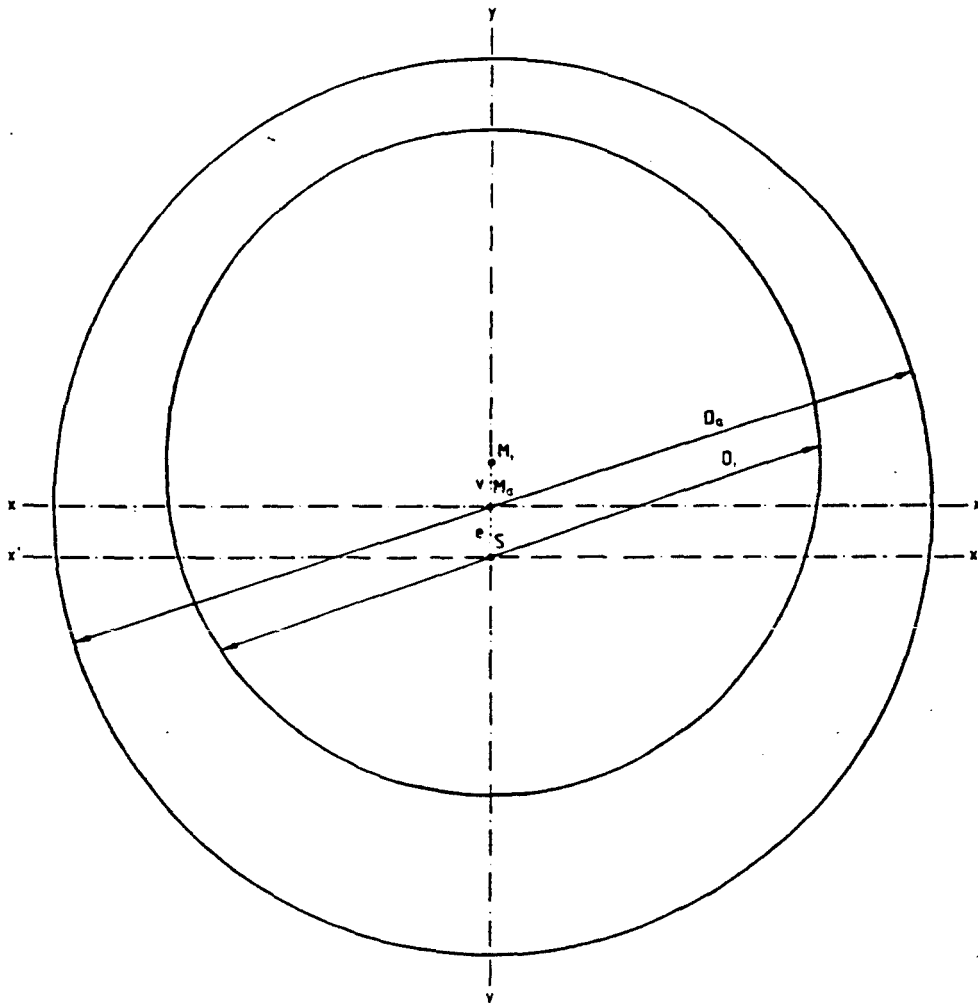


Bild 2 Exzentrischer Gußstützenquerschnitt aus [7]

Die Erfindung neuer Verfahren zur billigen Massenherstellung von Stahl verdrängte mit Ausgang des 19. Jahrhunderts das Gußeisen als Konstruktionsbaustoff. Der rasche Verlust des Stellenwertes von Gußeisen als Konstruktionsbaustoff ist in den günstigeren Festig-

keitseigenschaften von Walzstahl begründet. Das jetzt wiedererwachte Interesse an alten Gußeisenkonstruktionen beruht auf einem veränderten historischen Bewußtsein und einer architektonischen Renaissance des 19. Jahrhunderts. In vielen erhaltenenswerten Gebäuden sind noch Gußstützen anzutreffen, die aus denkmalpflegerischen Aspekten als tragende Bauteile erhalten bleiben sollen. Dem stehen zumeist baurechtliche Anforderungen an den Brandschutz entgegen, denen die Stützen ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen nicht genügen.

2.2 Bisherige Erkenntnisse

Mit der Verwendung von Gußeisen in Baukonstruktionen ging die Frage nach den mechanisch-technologischen Kennwerten einher. Gleichzeitig erwachte in der Blütezeit der Gußeisenverwendung das Interesse am Verhalten des Werkstoffes in bezug auf Festigkeit und Verformung. Gleichwohl gab es zunächst weder Konstruktions- und Dimensionierungshilfen noch systematische Werkstoffanalysen. Die Verwendung von Gußeisen erfolgte mehr oder weniger als Ersatz für Holz und Stein. Erste theoretische Arbeiten auf diesem Gebiet entstanden zu Beginn des 19. Jahrhunderts. In Hinblick auf das Verhalten von Gußeisen bei Brandbeanspruchung zeigten Erfahrungen aus Großbränden, daß die nichtbrennbaren Stützen den Brandeinwirkungen nicht lange widerstanden. Deshalb wurden Anforderungen und konstruktive Lösungen, z. B. durch Bekleidung mit feuerfestem Material, entwickelt.

Mit der Verdrängung des Gußeisens aus dem Bauwesen durch die Entwicklung von Stahl als Konkurrenzbaustoff wurden auch die Untersuchungen der Werkstoff- und Konstruktionseigenschaften eingestellt. Über den Werkstoff Gußeisen liegen daher dem Ingenieur, der sich heute mit Gußeisenkonstruktionen zu befassen hat, nur unzureichende Kenntnisse vor. Um diesem Mißstand abzuhelpen, müssen zerstörungssarme Methoden zur Erkundung der Werkstoffkennwerte und rechnerische Methoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Gußeisen-

konstruktionen erarbeitet werden. Hierzu hat die Arbeit von Käpplein [7] wesentliche Grundlagen, vor allem bezüglich der mechanischen und geometrischen Kennwerte bei Raumtemperatur, gelegt.

Das Verhalten von gußeisernen Stützen unter Brandeinwirkung wurde im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig in einer Reihe von kleineren Forschungsvorhaben [1 - 4] untersucht. Die durchgeführten Brandversuche an gußeisernen Stützen zeigten, daß bei Ausnutzung der zulässigen Gebrauchslast nach DIN 1051 die Versagenstemperatur für den gesamten zulässigen Schlankheitsbereich von $\lambda \leq 100$ mit $\text{crit } T \approx 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ angenommen werden kann. Eine Gußstütze mit einem U/A -Wert $\leq 100 \text{ m}^{-1}$ ohne brandschutztechnische Ertüchtigung erreicht bei voller Lastausnutzung nach DIN 1051 eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Die Feuerwiderstandsdauer kann durch Lastreduzierung oder durch das Aufbringen einer dämmschichtbildenden Brandschutzbeschichtung erhöht werden [2].

In der Oberösterreichischen Brandverhütungsstelle durchgeführte Brandversuche [9] sollten insbesondere den Einfluß der Lastausnutzung klären. Die Ergebnisse bestätigen im wesentlichen die Braunschweiger Versuche. So erreichten unverfüllte Gußstützen eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten bei voller Lastausnutzung gemäß DIN 1051 bzw. von 50 Minuten bei Lastreduzierung auf 50 %. Die Versuche an Gußstützen mit dämmschichtbildendem Anstrich zeigten kein einheitliches Verhalten, was in [9] u. a. mit dem frühzeitigen Aufreißen des Schaumes begründet wurde. Eine Betonverfüllung in Verbindung mit einem dämmschichtbildenden Anstrich ergab bei voller Lastausnutzung eine Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer um etwa 66 Minuten gegenüber einer ungeschützten Gußstütze.

3 TRAGVERHALTEN GUSSEISERNER STÜTZEN BEI RAUMTEMPERATUR

3.1 Geometrische Kennwerte

Für die Beurteilung des Tragverhaltens alter gußeiserner Stützen ist es von entscheidender Bedeutung, die geometrischen und strukturellen Imperfektionen (z. B. Einschlüsse und Lunker) genauer zu kennen. Bedingt durch die handwerklich geprägten Herstellungsverfahren weisen die Gußstützen diesbezüglich große Streuungen auf. Bei offenen Profilformen, wie I-Stützen, ist die Querschnittsgeometrie relativ einfach zu ermitteln, bei geschlossenen Profilen, wie Hohlstützen, jedoch wesentlich schwieriger.

Die Erkundung alter Gußstützenhohlprofile hat immer wieder gezeigt, daß es beträchtliche Abweichungen von der planmäßig vorgegebenen Form gibt. Infolge einer Verschiebung der Gießkerne während des Herstellungsvorganges ergeben sich ungleichmäßige Wandungsdicken sowohl über den Stützenumfang eines bestimmten Schnittes als auch über die Stützenlänge. Für eine zutreffende Ermittlung der Tragfähigkeit müssen daher umfangreiche Messungen sowohl in Umfangsrichtung des Stützenquerschnittes als auch über die Längsrichtung der Stütze durchgeführt werden. Als ideale, zerstörungsfreie Methode zur Ermittlung der Querschnittsgeometrie hat sich die Ultraschallmethode erwiesen, wobei der Genauigkeitsgrad mit der Anzahl der Meßpunkte gesteigert werden kann. Bild 3 zeigt Ergebnisse einer solchen Ultraschallvermessung für die Gußstütze BS1; entsprechende Messungen wurden für alle Versuchsstützen mit Ausnahme von BS8 (von Mitarbeitern des SFB 315) durchgeführt (siehe Anlagen 1 bis 8).

3.2 Mechanische Kennwerte

Bei Gußeisen handelt es sich um einen metallischen Werkstoff mit einem Kohlenstoffgehalt von 2 % bis 4 % und einem gegenüber Stahl höherem Silizium- und geringerem Mangangehalt. Der Kohlenstoff

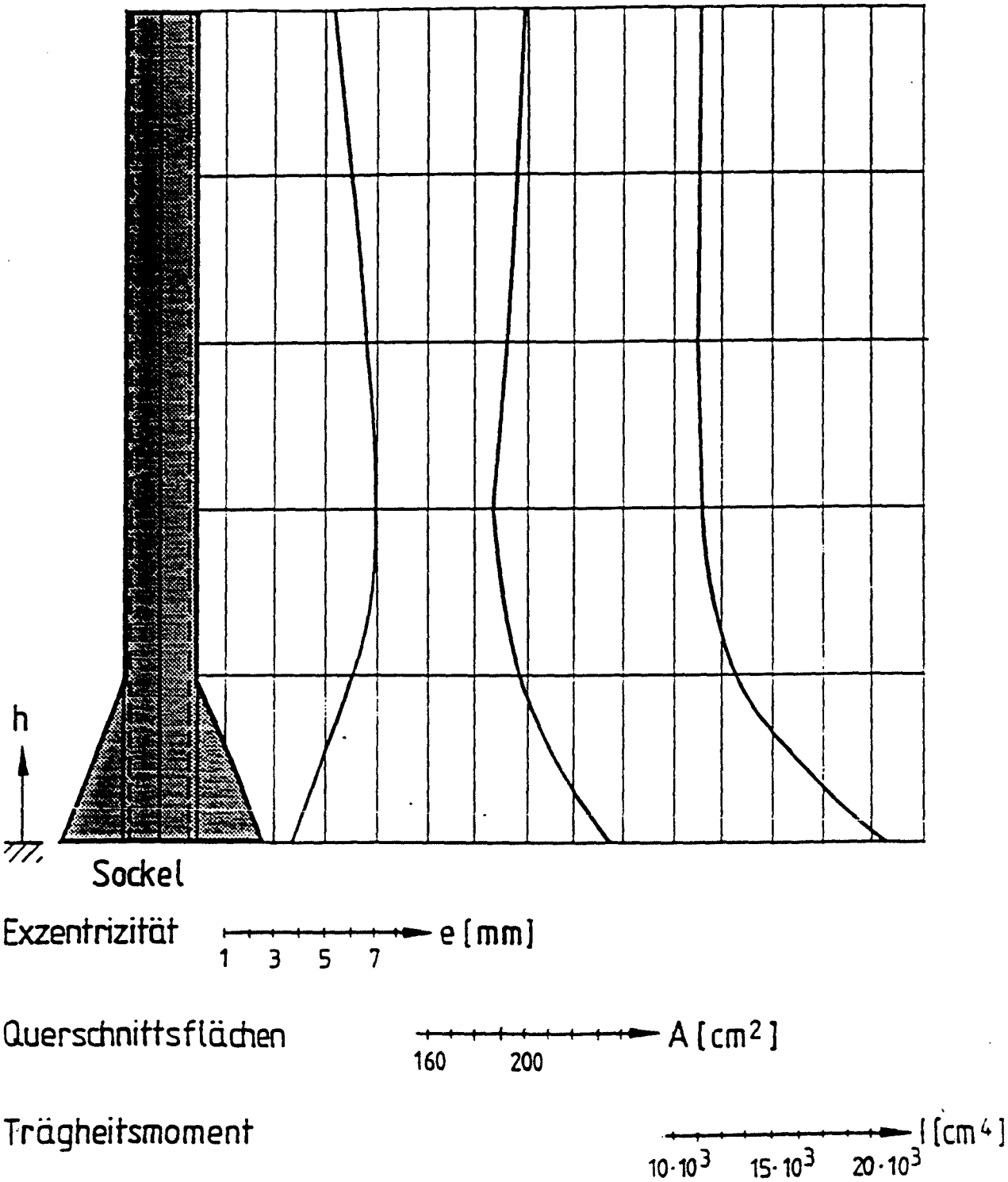


Bild 3 Verlauf der Querschnittswerte der Versuchsstütze BS1 über die Höhe

fällt als Graphit in lamellarer oder kugelig Form aus. Dies führt aufgrund der Störung des inneren Spannungsverlaufes (innere Kerbwirkung) zu einer gegenüber der Druckfestigkeit geringen Zugfestigkeit und zu großer Sprödigkeit. Materialuntersuchungen in Form von Kernbohrungen aus den in [1 - 4] untersuchten Stützen ergaben Zugfestigkeiten von ca. 100 - 150 N/mm² und Druckfestigkeiten von ca. 400 - 600 N/mm². Hieraus resultiert ein Verhältnis Druck- zu Zugfestigkeit von ca. 4.

3.3 Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit

Die rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit von Gußstützen unter Raumtemperatur war in der DIN 1051 [7] geregelt, die 1969 zurückgezogen wurde. Die Norm gab zulässige Druckspannungen in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades für einen Grauguß GG-14 an (Bild 4). Die zulässige Druckspannung betrug 90 N/mm² bei einem Schlankheitsgrad von 0 und wurde in Abhängigkeit der Schlankheit reduziert, z. B. für eine in der Praxis häufig vorkommende Schlankheit von $\lambda = 65$ auf 45 N/mm². Bezogen auf die Bruchspannungen von Gußeisen bedeutet dies, daß hier Materialsicherheitsbeiwerte von > 6 vorliegen, die auch die ansonsten beim Nachweis unberücksichtigten herstellungsbedingten geometrischen und strukturellen Imperfektionen abdecken.

Durch Käpplein [7] wurde 1991 erstmalig auf die geometrischen und strukturellen Imperfektionen bei Gußhohlprofilstützen näher eingegangen. Er entwickelte für die Ermittlung der Gebrauchslasten von gußeisernen Stützen ein Bemessungsverfahren auf der Grundlage der Traglastmethode unter Berücksichtigung entsprechender Teilsicherheitsbeiwerte. Verglichen mit dem in der ehemaligen DIN 1051 aufgeführten Bemessungsverfahren, ist dieses Konzept wesentlich differenzierter und führt zu einer zutreffenderen Ermittlung der Tragfähigkeit von Gußhohlprofilstützen.

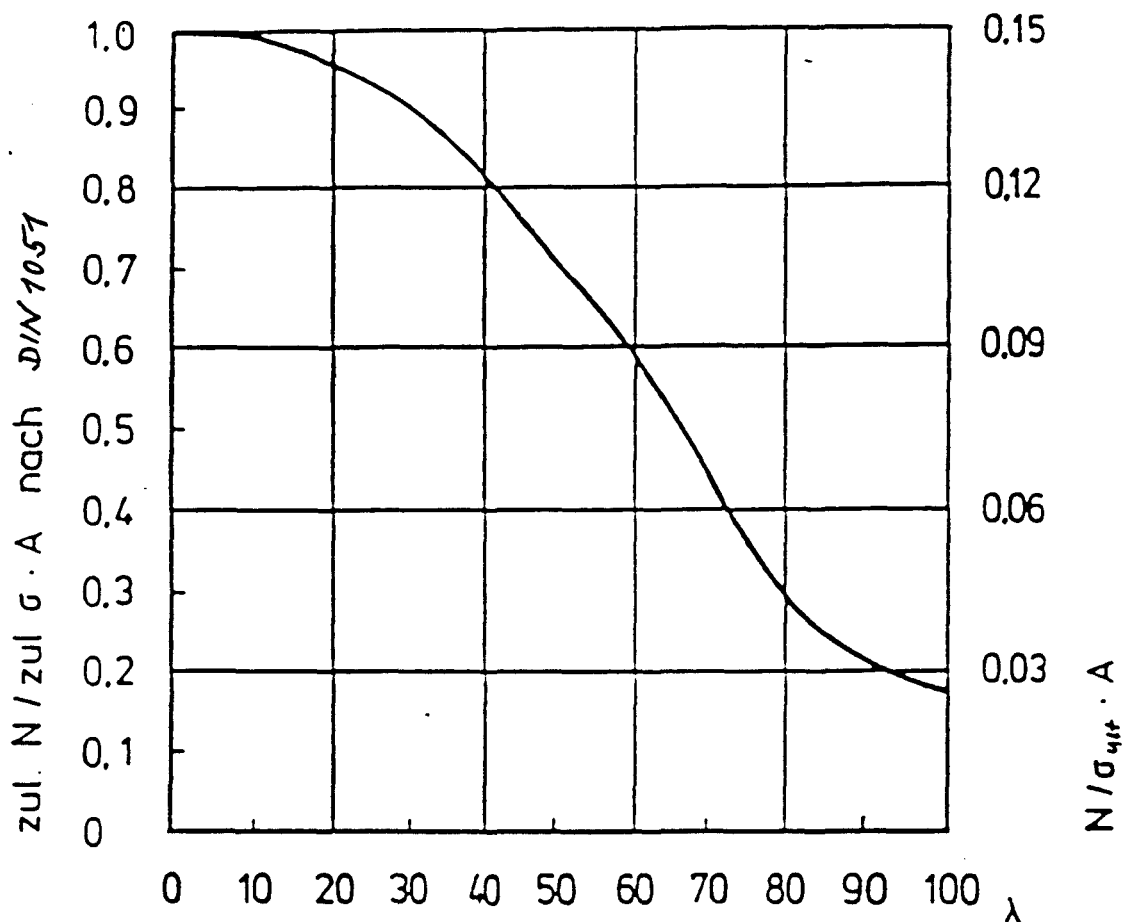


Bild 4 Zulässige Ausnutzung von Gußstützen in Abhängigkeit der Schlankheit

4 HOCHTEMPERATUR- MATERIALKENNWERTE VON GUSSEISEN

4.1 Allgemeines

Im Hinblick auf einen erwünschten rechnerischen Nachweise von gußeisernen Stützen bei Brandbeanspruchung analog zur Tragfähigkeit bei Raumtemperatur werden Materialkennwerte unter erhöhter Temperatur benötigt, und zwar in den einzelnen Berechnungsschritten:

- Thermische Analyse

temperaturabhängige wärmetechnische Kennwerte des Gußeisens zur Ermittlung des Erwärmungsverhaltens der Stützenquerschnitte,

- Thermomechanische Analyse

temperaturabhängige mechanische Werkstoffkennwerte (z. B. Spannungs-Dehnungs-Linien) zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens der Stütze in Abhängigkeit der Branddauer.

4.2 Wärmetechnische Kennwerte

Für die Ermittlung der Querschnittstemperaturen der Gußstützen bei Brandeinwirkung werden folgende wärmetechnischen Kennwerte des Gußeisens benötigt:

- thermischer Ausdehnungskoeffizient α_T
- Dichte ρ
- spezifische Wärmekapazität c_p
- Wärmeleitfähigkeit λ .

Diese Kennwerte sind selbst von der Temperaturerhöhung abhängig. In Bild 5 ist die leicht überproportional mit der Temperatur wachsende thermische Dehnung ϵ_{th} von Grauguß entsprechend einem aus Versuchsergebnissen abgeleiteten Näherungsansatz aufgetragen; zum Vergleich sind die Werte für Beton eingezeichnet. Bild 6 zeigt die aus den Untersuchungen [4] gewonnenen übrigen wärmetechnischen Kennwerte von Gußeisen in Abhängigkeit von der Temperatur.

Im Hinblick auf die brandschutztechnische Ertüchtigung von Gußstützen durch einen dämmschichtbildenden Anstrich wurden auf der Grundlage von Erwärmungsversuchen an Stützenabschnitten durch umfangreiche Vergleichsrechnungen äquivalente wärmetechnische Kennwerte abgeleitet, die eine näherungsweise Berücksichtigung des Dämmschichtbildners bei der Berechnung der Querschnittstemperaturen ermöglichen. In Bild 7 sind diese wärmetechnischen Kennwerte für die untersuchte dämmschichtbildende Beschichtung graphisch dargestellt.

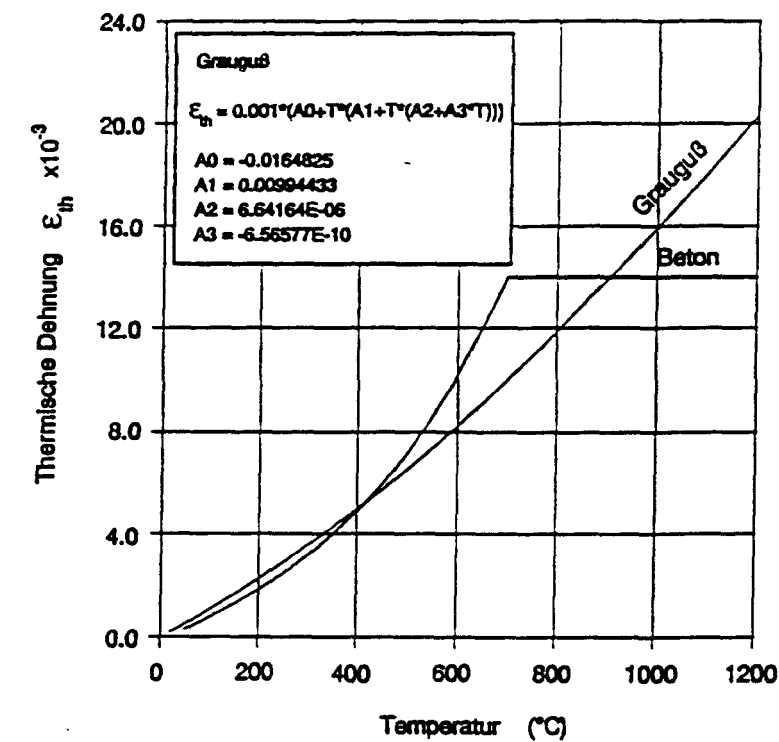


Bild 5 Thermische Dehnung von Grauguß im Vergleich zu Beton in Abhängigkeit von der Temperatur

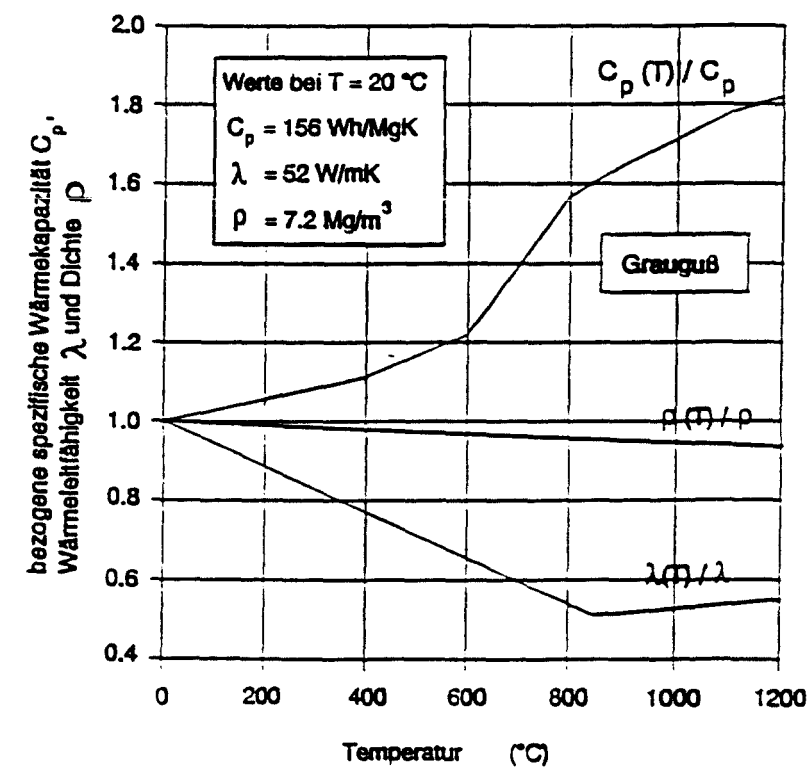


Bild 6 Wärmetechnische Kennwerte von Gußeisen in Abhängigkeit von der Temperatur

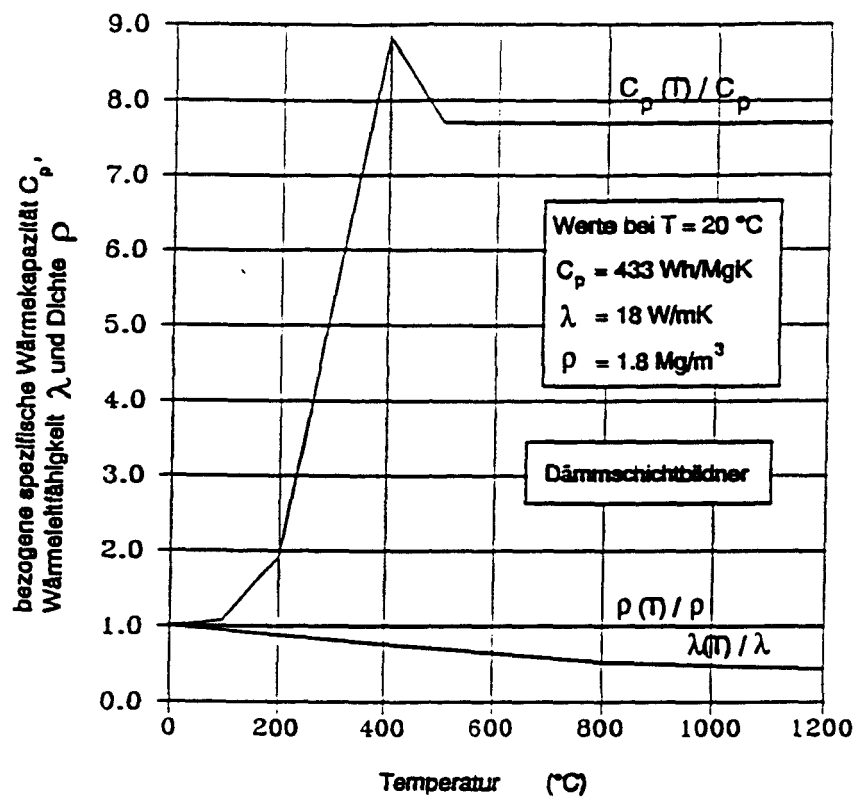


Bild 7 Wärmetechnische Kennwerte von Gußeisen mit dämmschichtbildender Beschichtung in Abhängigkeit von der Temperatur

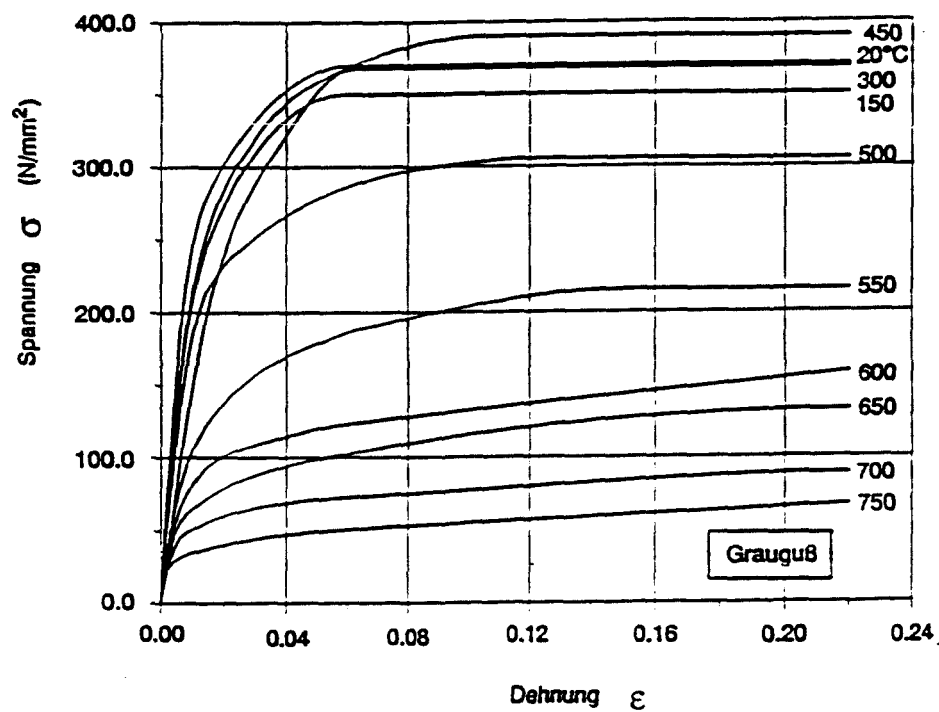


Bild 8 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs-Linien für Gußeisen

6.3 Thermomechanische Kennwerte

Für die Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stützen bei hohen Temperaturen werden die temperaturabhängigen mechanischen Kennwerte von Gußeisen, insbesondere die Spannungs-Dehnungs-Linien, benötigt. Zu deren experimenteller Ermittlung wurden Druck-Warmkriechversuche an zylindrischen Gußproben durchgeführt. Die bei Raumtemperatur statisch belastete Probe wird dabei mit einer konstanten Aufheizgeschwindigkeit erwärmt. Diese im SFB 148 "Brandverhalten von Bauteilen" in Braunschweig entwickelte Versuchstechnik [10] simuliert den Ablauf bei einem realen Schadenfeuer, bei dem die unter Last stehenden Bauteile einer stationären Temperaturbeanspruchung ausgesetzt sind. Gemessen werden die Gesamtdehnungen der Probe in Abhängigkeit von der Temperatur bei jeweils konstanter Druckspannung und vorgegebener Aufheizgeschwindigkeit. An unbelastet erwärmten Vergleichsproben wird die thermische Dehnung und die zur Bestimmung der elastischen Dehnungsanteile erforderliche Veränderung des E-Moduls bestimmt. Damit können die sog. spannungserzeugenden Dehnungen als Differenz aus den Gesamtdehnungen und den thermischen sowie elastischen Anteilen separiert werden. Werden die unterschiedlich vorgegebenen Spannungen der Proben über den bei einer bestimmten Temperatur gemessenen Dehnungen aufgetragen, dann erhält man die in Bild 8 dargestellten temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Linien für Gußeisen. Auffällig ist, daß ein nennenswerter Festigkeitsabfall erst bei Temperaturen oberhalb von 450 °C einsetzt. Dies wird noch deutlicher in Bild 9, das die aufnehmbare Spannung bei erhöhter Temperatur als Anteil der Bruchspannung bei Raumtemperatur zeigt.

5 NORMBRANDVERSUCHE MIT GUSSEISERNEN STÜTZEN

5.1 Brandversuchsstand und Versuchsaufbau

Die Normbrandversuche mit Gußstützen wurden im Stützenbrandhaus des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU

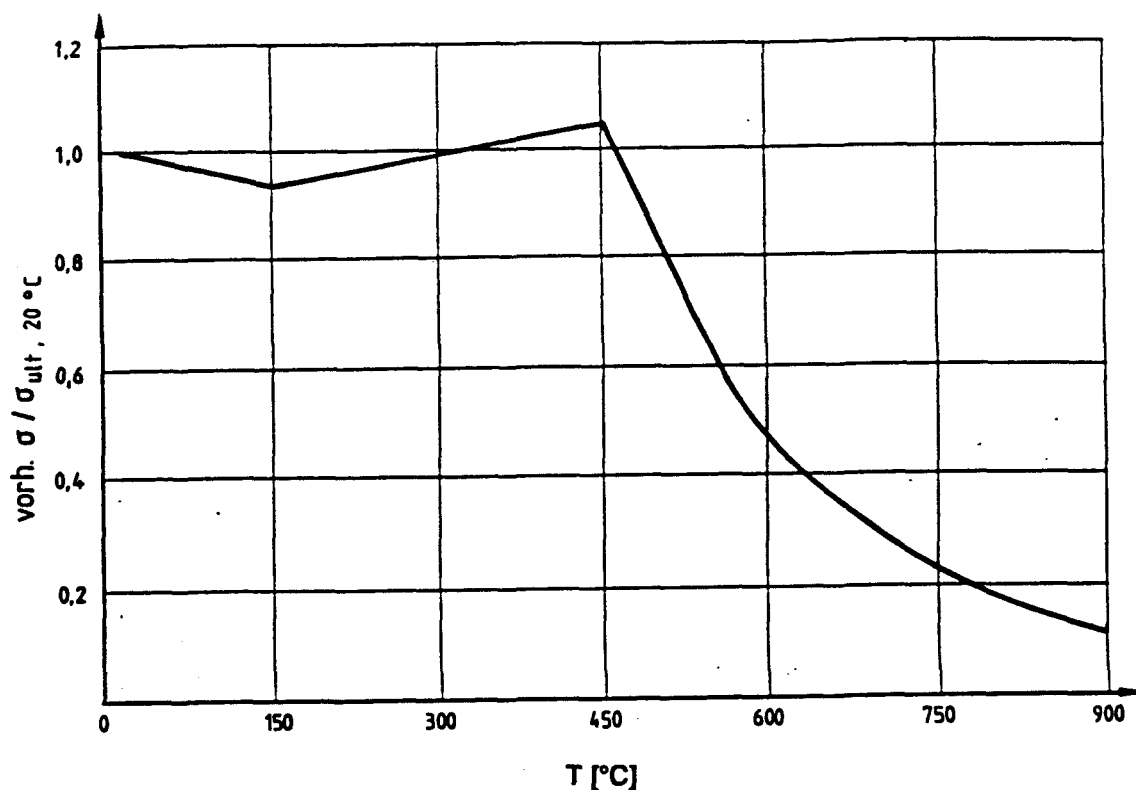
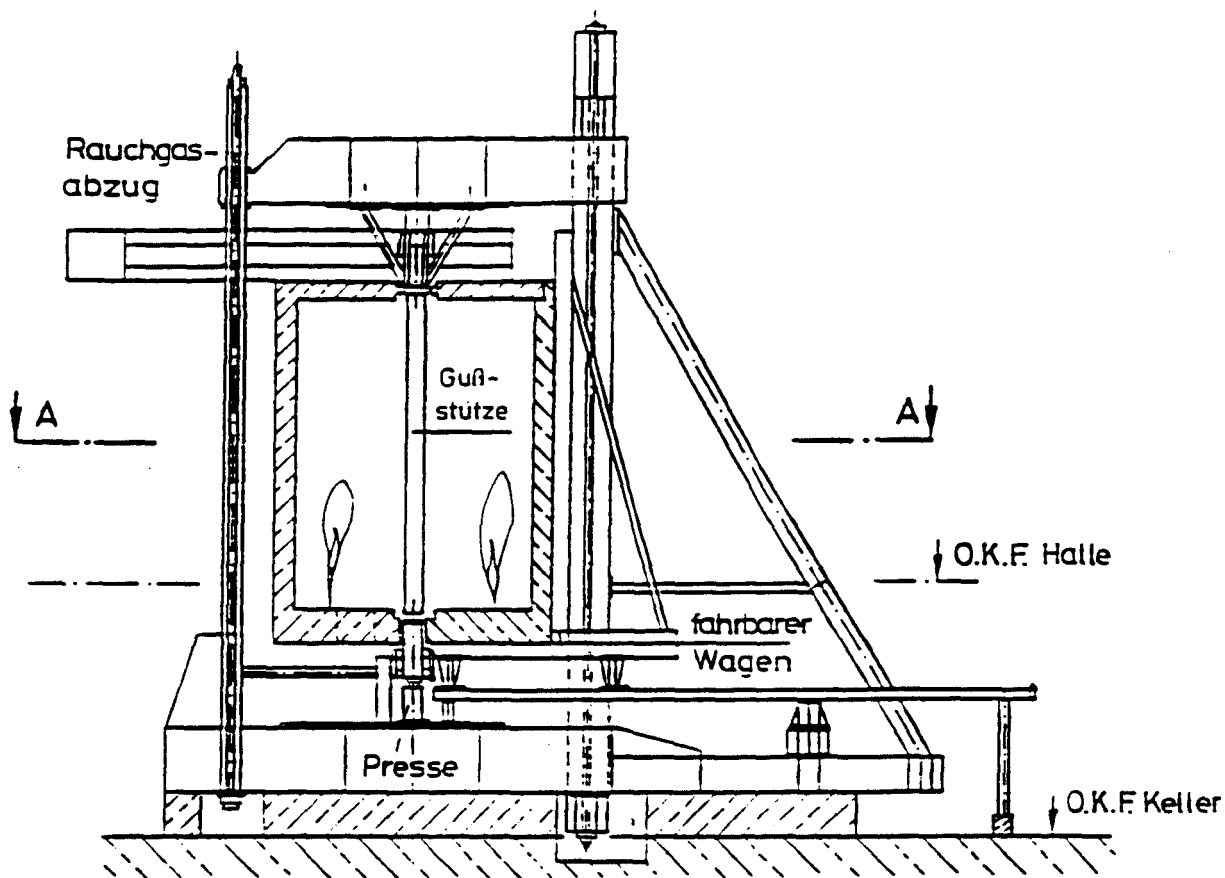


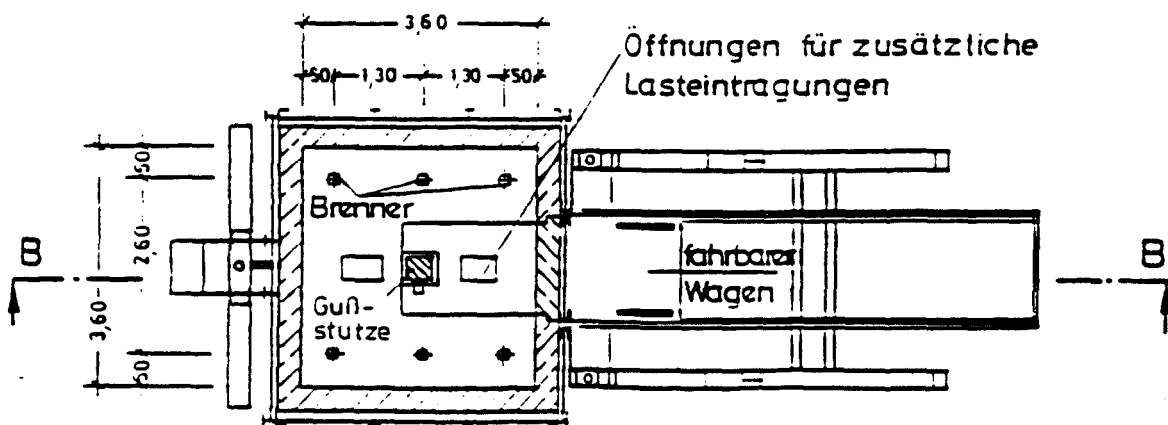
Bild 9 Aufnehmbare Spannung von Gußeisen bei erhöhter Temperatur als Anteil der Bruchspannung bei Raumtemperatur

Braunschweig durchgeführt. Der in Bild 10 dargestellte Brandversuchsstand hat eine Grundfläche von 3,60 m x 3,60 m. Die Beflammung des Brandraums erfolgt durch sechs Ölbrenner (Heizöl EL nach DIN 51603). Die Brenner sind im Brandraumboden angeordnet. Ihre Flammenachsen verlaufen parallel zur Stützenlängsachse. Die Entwicklung der Brandraumtemperaturen entsprach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe September 1977. Zur Steuerung der Temperaturbeanspruchung dienten sechs in ca. 10 cm Abstand von der Versuchskörperoberfläche in drei Meßebenen angeordnete Thermoelemente (NiCr-Ni-Mantelthermoelemente, \varnothing 3,2 mm). Je zwei Thermoelemente befanden sich in einer der drei Meßebenen, 1,0 m vom Stützenkopf entfernt, in Stützenmitte und 1,0 m vom Stützenfuß entfernt.

Die Stützen wurden oben und unten stumpf gegen die Belastungsrichtung gefahren. Diese Lagerung entspricht dem Euler-Fall IV.



Schnitt B-B



Schnitt A-A

Bild 10 Brandversuchsstand für Stützenprüfungen (schematisch)

Aufgrund der geometrischen Randbedingungen der Stützen mit einer massigen Kopfaufweitung und einer am Stützenfuß verhältnismäßig geringen Steifigkeit stellen sich im Versuch nahezu die Lagerungsbedingungen des Euler-Falls III ein. Die unbelasteten Stützenstummel wurden auf Porenbetonsockel bzw. auf den Brandraumboden gestellt und in den Ecken des Brandraumes angeordnet.

5.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Die Festlegung der Versuchslasten der Gußstützen erfolgte einerseits nach der Norm DIN 1051 [8] für den Euler-Fall II und andererseits auf der Grundlage der Traglasten nach Kapplein [7]. Die Abmessungen, die Belastung und die Lagerungsbedingungen der Versuchsstützen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 Abmessungen, Belastung und Lagerungsbedingungen der Versuchsstützen

Stützen- bezeichnung	Querschnittswerte				Stützen- länge L	vorh N	vorh e	Lagerung Eulerfall Nr.
	Außen- ϕ (mm)	t _{max} (mm)	t _{min} (mm)	t _{mittel} (mm)				
BS1	230	32	23	27	370	500	6.50	III
BS2	230	32	27	28	370	1000	5.00	III
BS3	230	29	26	27	370	880	3.00	III
BS6	230	35	19	25	370	700	13.0	III
BS7 (DSB)	230	45	25	35	370	900	5.00	III
BS8 (DSB)	230	40	30	35	370	900	unbek.	III
P4	300	35	25	30	425	1900	6.00	III
P17	300	32	21	26	370	610	12.0	III

Die Belastung wurde zentrisch über zwei last- und weggesteuerte Pressen aufgebracht. Die Darstellung der Lasteinleitungspunkte ist aus Bild 10 ersichtlich. Die Versuchslast wurde kontinuierlich gesteigert und während der Brandversuche konstant gehalten. Die Ver-

suche wurden beendet, wenn die Verformungen der Gußstützen so schnell anwuchsen, daß die Pressenkräfte nicht mehr gehalten werden konnten.

Die Gußtemperaturen und die Längenänderungen der Versuchskörper wurden von einer elektronischen Vielstellenmeßanlage in Abständen von 60 Sekunden aufgenommen. Zur Ermittlung der Gußtemperaturen wurden die Gußstützen mit jeweils zwölf Meßstellen (NiCr-Ni-Thermoelemente) auf der Stützenoberfläche versehen, die in drei Meßebenen längs der Versuchskörperachse angeordnet wurden. Die Lage der Meßebenen und der Meßstellen sind Bild 11 zu entnehmen. Bei den etwa 1,0 m hohen Stützenstummeln waren die Temperaturmeßstellen über den Umfang in der Mitte der Stummellänge angeordnet. Die Prüflast wurde sowohl über die Vielstellenmeßanlage als auch über Linien-schreiber kontrolliert. Die Längsverformung der Gußstützen wurde mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern an der Presse und im Belastungsgerüst so gemessen, daß die Verformungen der Belastungseinrichtung kompensiert wurden.

Zusammen mit der Versuchsstütze BS2 wurden zwei unbelastete Stützenstummel mit großer bzw. geringer Wanddicke geprüft. Bei Versuchsstütze BS7 wurden drei mit einem dämmschichtbildenden Anstrich versehene Stützenstummel mit in den Brandraum gestellt, wobei ein Stützenstummel zusätzlich ausbetoniert war. Die Kenndaten der Stützenstummel sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Kenndaten der unbelasteten Stützenstummel

Stützen- abschnitt	Querschnittswerte Außen- ϕ (mm)	t mittel (mm)	Abschnitts- länge (mm)	Trocken- schicht- dicke DSB (μ m)	Beton- verfüllung
1	185	29	1000	740	B 25
2	172	28	1000	830	-
3	154	17	1000	620	-
4	178	28	1000	-	-
5	123	12	1000	-	-

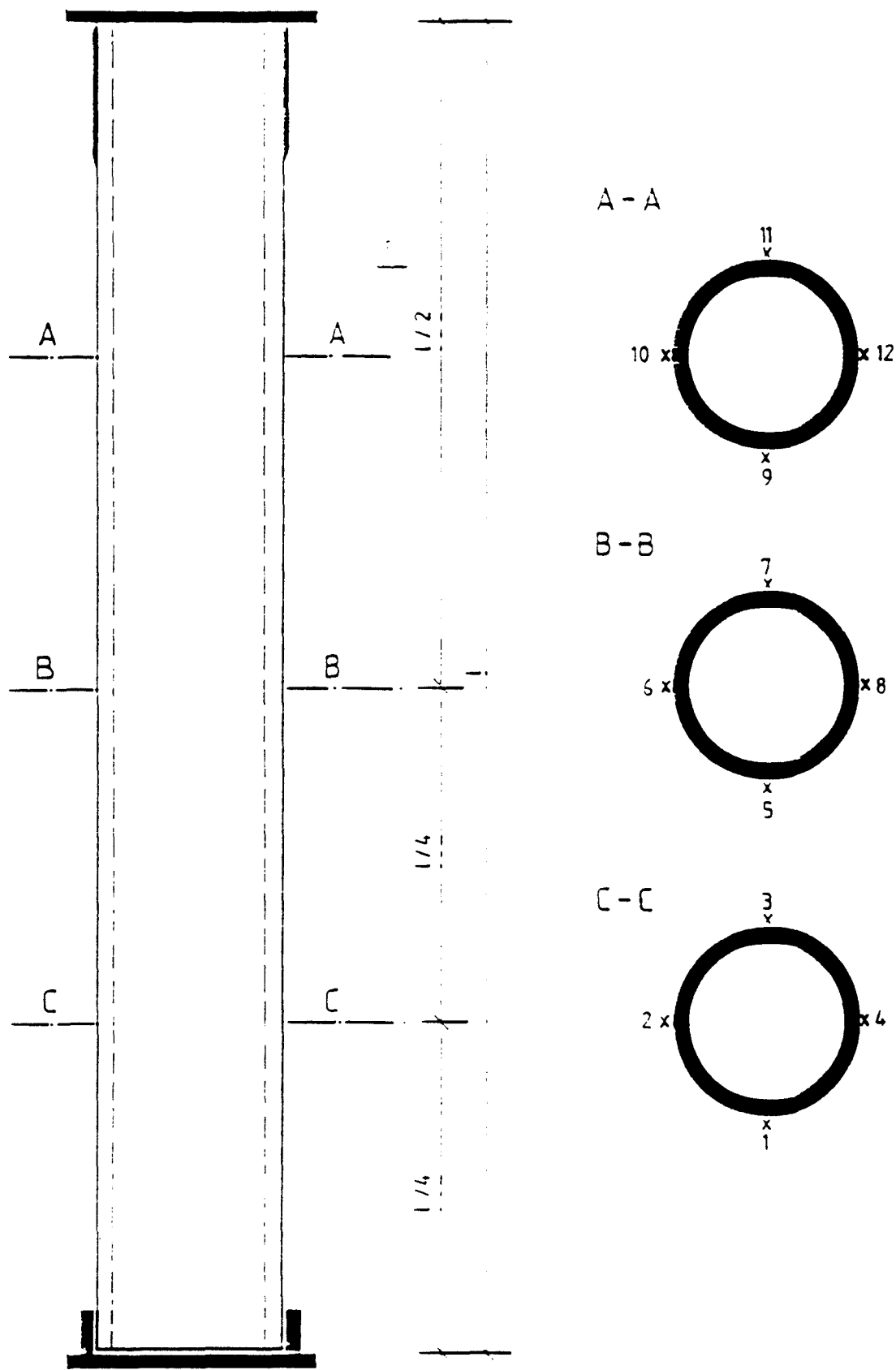


Bild 11 Lage der Meßstellen bei den Versuchsstützen

5.3 Versuchsergebnisse

Bei allen geprüften Gußstützen nahmen die Ausbiegungen gegen Versuchsende deutlich zu, und die Gußstützen versagten durch Ausknicken. Die Knickfigur bei Versuchsende entsprach annähernd den Lagerungsbedingungen des Euler-Falls III.

Die während der Brandversuche im Brandraum und auf den Oberflächen der Versuchsstützen gemäß Tabelle 1 gemessenen Temperaturen sind in den Anlagen 8 bis 23 wiedergegeben. Die Oberflächentemperaturen der Stützenstummel gemäß Tabelle 2 sind in Anlagen 24 bis 29 dargestellt. Die Anlagen 30 bis 37 zeigen die Längsverformungen der Versuchsstützen.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Normbrandversuche an den Gußstützen gemäß Tabelle 1 zusammengestellt. Als Versagenszeitpunkt (Feuerwiderstandsdauer) t_u wurde der Zeitpunkt angenommen, ab dem die Stütze die vorgegebene Prüflast nicht mehr tragen konnte und sich der Last durch zunehmende Verformung entzog. Für die Ermittlung der zugehörigen Versagenstemperatur T_u wurde der Mittelwert aus den vier Meßstellen in Stützenmitte berechnet.

Tabelle 3 Zusammenstellung der Ergebnisse der Normbrandversuche

Stützen- bezeichnung	Querschnittswerte Außen- ϕ (mm)	t_{mittel} (mm)	U/A- Wert (1/m)	Stützen- länge (cm)	vorh N (kN)	t_u (min)	T_u (°C)
BS1	230	27	37	370	500	57	850
BS2	230	28	36	370	1000	34	700
BS3	230	27	37	370	880	37	725
BS6	230	25	40	370	700	38	730
BS7 (DSB)	230	35	29	370	900	120	625
BS8 (DSB)	230	35	29	370	900	89	700
P4	300	30	33	425	1900	24	600
P17	300	26	38	370	610	50	775

Die Brandversuche haben gezeigt, daß die Verformbarkeit der Gußstützen bei Druckbeanspruchung unter Hochtemperatur mit der von Stahlstützen vergleichbar ist. Alle Gußstützen versagten durch Plastifizierung des Querschnitts in Stützenmitte. Die Knickfigur bei Versuchsende entsprach nahezu den Lagerungsbedingungen des Euler-Falls III. In Bild 12 ist die bezogene Versuchslast ($N/zul\ \sigma_d \cdot A$ mit $zul\ \sigma_d \cdot A =$ zulässige Gebrauchslast nach DIN 1051) jeweils über der in den Versuchen ermittelten Feuerwiderstandsdauer aufgetragen. Zusätzlich ist das Verhältnis der Versuchslast zur Bruchlast angegeben.

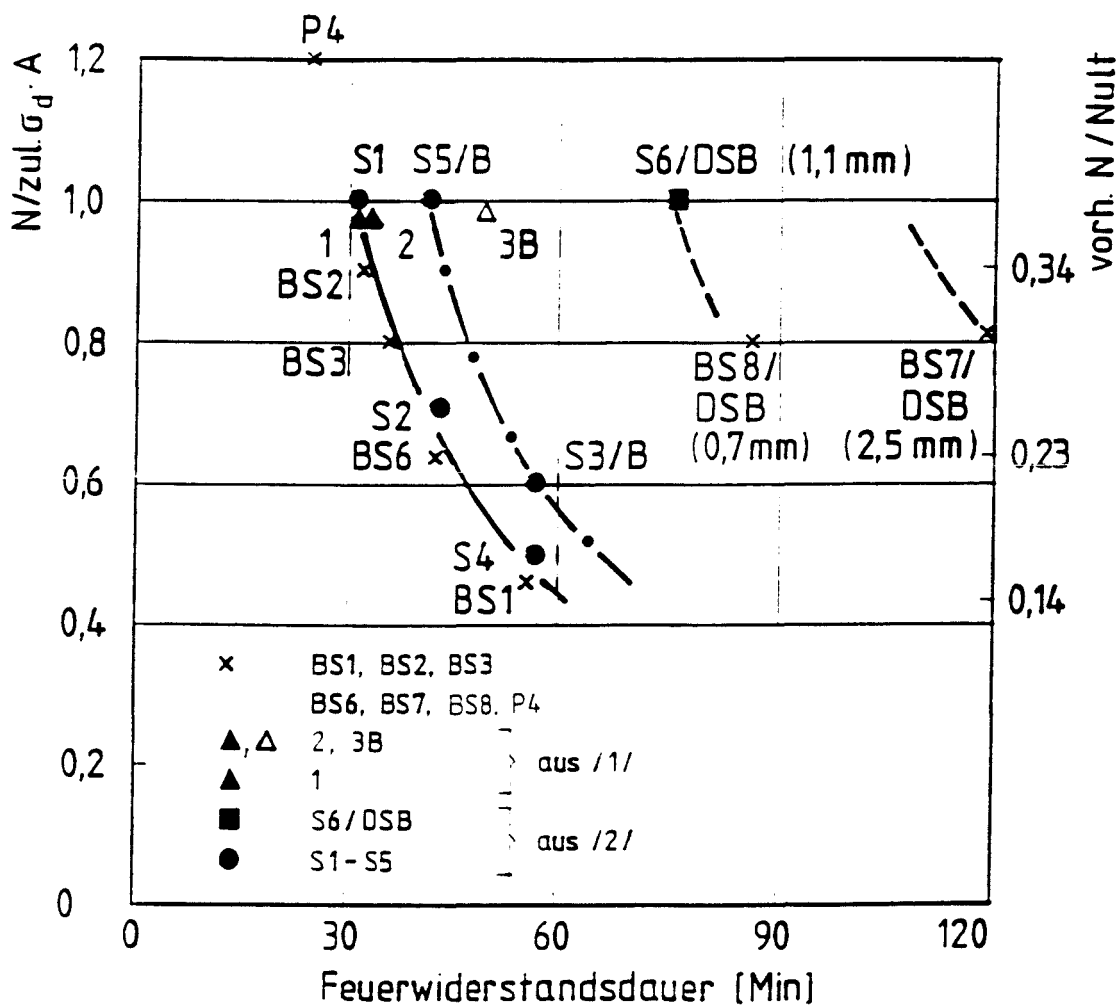


Bild 12 Feuerwiderstandsdauer von Gußstützen in Abhängigkeit von der Lastausnutzung und der Brandschutzmaßnahme; zum Vergleich Stahlstützen nach [1]

Nach den im Brandversuch gemessenen Oberflächentemperaturen erwärmen sich ungeschützte Gußstützen relativ gleichmäßig, so daß die Oberflächentemperatur unmittelbar als Versagenskriterium herangezogen werden kann. Zum Versagenszeitpunkt betrug die Oberflächentemperatur bei voller Lastausnutzung nach DIN 1051 etwa 750 °C und bei einer Lastausnutzung von 50 % sogar etwa 850 bis 950 °C.

Die Ergebnisse zeigen, daß ungeschützte Gußstützen mit Profilbeiwerten von $U/A \leq 100 \text{ m}^{-1}$ bei 100%iger Ausnutzung der schlankkeitsbedingten Gebrauchslast nach DIN 1051 eine Feuerwiderstandsdauer von etwa 30 Minuten erreichen. Dies entspricht etwa einem Verhältnis $N_{\text{vorh}}/N_{\text{ult}} \leq 0,35$. Bei Lastreduzierung auf ca. 50 % nach DIN 1051 bzw. $N_{\text{vorh}}/N_{\text{ult}} \leq 0,15$ kann die Feuerwiderstandsdauer auf etwa 60 Minuten erhöht werden. Wie bereits die ersten Untersuchungen [2] ergaben, bewirkt eine Betonverfüllung des Stützenhohlraumes eine Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer um etwa 15 Minuten im Vergleich zu ungeschützten Gußstützen. Als eine wesentlich wirksamere Brandschutzmaßnahme ist die Beschichtung mit einem dümm-schichtbildenden Anstrich anzusehen. Nach den bislang vorliegenden Versuchsergebnissen erscheinen bei Gußstützen mit dümm-schichtbildendem Anstrich je nach Querschnittsabmessungen, Lastausnutzungsgrad und Schichtdicke Feuerwiderstandsdauern bis über 90 Minuten erreichbar.

6 WERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

In Bild 13 sind die in den Normbrandversuchen gemäß Abschnitt 5 ermittelten Feuerwiderstandsdauern von unbehandelten Gußstützen, unter Einbezug der Ergebnisse aus [1, 2, 9], in Abhängigkeit vom Lastausnutzungsgrad und Profilfaktor U/A aufgetragen. Demnach spielt der U/A -Wert nur eine relativ geringe Rolle. Die Gußstützen versagen also aufgrund ihrer geringen Auslastung im Brandfall erst dann, wenn ihre Querschnittstragfähigkeit unter erhöhter Temperatur erschöpft ist. Das wesentliche Kriterium für die Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer ist somit der Ausnutzungsgrad α .

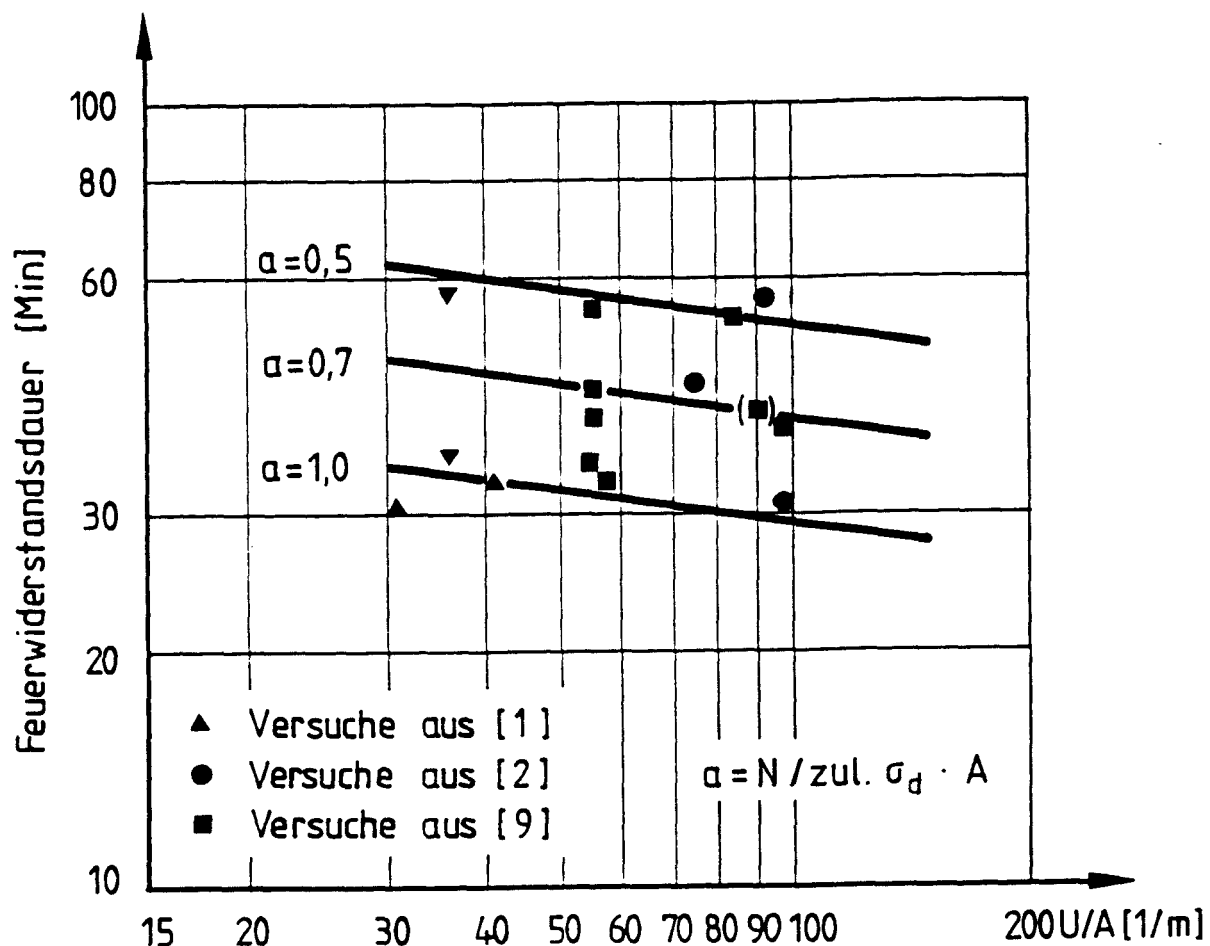


Bild 13 Feuerwiderstandsdauer in Abhängigkeit von der auf die schlankheitsbedingte Gebrauchslast nach DIN 1051 bezogene Versuchslast (BS, S, P = Versuchsbezeichnungen, B = Betonfüllung, DSB = Dämmschichtbildner)

Sieht man von einer in der Regel unerwünschten Ummantelung der Gußstützen ab, ist eine Beschichtung mit einem dämmschichtbildenden Anstrich eindeutig die wirksamste Brandschutzmaßnahme. Wie aus Bild 14 ersichtlich ist, streut die erreichbare Feuerwiderstandsdauer erheblich. Dies ist zum größten Teil auf das unterschiedliche Verhalten der zur Anwendung gekommenen Brandschutzsysteme zurückzuführen. Generell gilt, daß ein für Hohlprofilstützen aus Stahl für die Feuerwiderstandsklasse F 30 nach DIN 4102 Teil 2 zugelassenes Brandschutzsystem auch für die Anwendung auf Gußholprofilen geeignet ist. Die aufzubringende Schicht-

dicke muß sich an der in der Zulassung angegebenen Schichtdicke für Stahlstützen orientieren. Nach den eigenen Versuchsergebnissen ist mit einem dämmschichtbildenden Anstrich in Abhängigkeit von der Schichtdicke und dem Ausnutzungsgrad eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erzielbar.

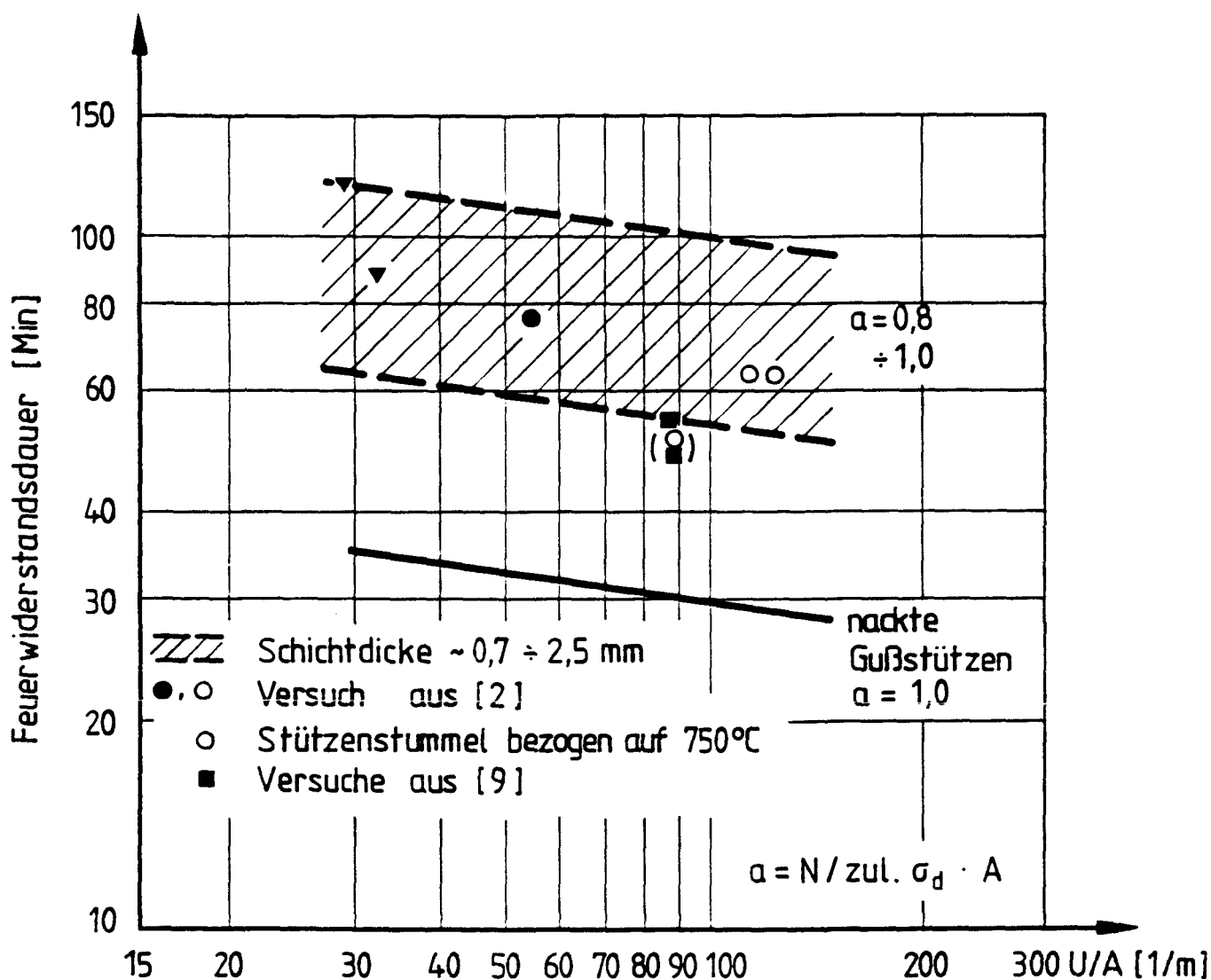


Bild 14 Streuungen der Feuerwiderstandsdauer von Gußstützen ohne und mit dämmschichtbildendem Anstrich

Dagegen läßt sich Betonverfüllung bei voller Lastausnutzung nach DIN 1051 lediglich eine Steigerung der Feuerwiderstandsdauer um ca. 15 Minuten gegenüber unverfüllten Gußstützen erreichen. In Bild 14 ist auch die von Wagner [9] an einer sowohl betonverfüll-

Versuchsergebnis von Wagner [9] an einer sowohl betonverfüllten als auch beschichteten Gußstütze erkennbar. Die Kombination aus Betonverfüllung und dämmschichtbildnendem Anstrich wurde deshalb in den eigenen Versuchen nicht weiter verfolgt, zumal in der Praxis die Betonverfüllung generell problematisch ist und mit Aufbringen eines Dämmschichtbildners bereits die im allgemeinen ausreichende Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht wird.

7 RECHNERISCHER NACHWEIS DER TRAGFÄHIGKEIT IM BRANDFALL

7.1 Rechenverfahren

Zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen unter Brandeinwirkung steht das im iBMB entwickelte Rechenprogramm STABA-F [5] zur Verfügung. Im Rahmen eines Unterauftrages [3] für den Sonderforschungsbereich 315 "Erhaltung historisch bedeutsamer Bauwerke" an der Universität Karlsruhe wurden die in Abschnitt 4 beschriebenen Materialkennwerten für Gußeisen unter hohen Temperaturen in dieses Rechenprogramm implementiert. Mit dem erweiterten Rechenprogramm konnten die bisher durchgeführten Normbrandversuche an Gußstützen erfolgreich nachgerechnet und besser interpretiert werden. Grundlage für die rechnerischen Untersuchungen waren im wesentlichen die Versuche im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen, ergänzt durch einige Versuche in [3] an genau vermessenen ungeschützten Gußstützen.

Mit Hilfe des Programms STABA-F können zwei Probleme des baulichen Brandschutzes gelöst werden:

- Berechnung der Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils bei definiertem Temperaturzeitverlauf in der Bauteilumgebung und vorgegebener Belastung und Lagerung oder
- Berechnung der von einem Bauteil maximal aufnehmbaren Belastung bei definiertem Temperaturzeitverlauf in der Bauteilumgebung und vorgegebener Brandeinwirkungsdauer.

Das Programm STABA-F besteht aus drei Programmteilen:

- Ermittlung der instationären Temperaturfelder,
- Ermittlung der nichtlinearen Beziehung zwischen Biegemoment und Krümmung (Querschnittssteifigkeit) bei vorgegebener Längskraft,
- Ermittlung der Zustandsgrößen nach Theorie 2. Ordnung bei beliebiger Lagerung der Bauteile.

Eine ausführlichere Beschreibung des Programms STABA-F ist [5] bzw. [3] zu entnehmen.

Die geometrischen Imperfektionen der gußeisernen Stützen wurden über zwei verschiedene Näherungsansätze berücksichtigt (Bild 15):

- a) Die Berechnung wird mit einer gemittelten konstanten Wandungsdicke und einer über die Stützenlänge konstanten Exzentrizität durchgeführt.
- b) Die geometrische Imperfektion wird durch einen symmetrischen Wandungsdickensprung von t_{\min} zu t_{\max} berücksichtigt.

7.2 Vergleich von Versuch und Berechnung

Mit dem Rechenverfahren STABA-F [5] wird zunächst die Temperaturentwicklung im Querschnitt bis zum Versagenszeitpunkt ermittelt. Bild 16 zeigt beispielhaft für die Versuchsstütze BS2 den Vergleich zwischen der im Brandversuch gemessenen Oberflächentemperatur der ungeschützten Gußstütze und der unter Ansatz der in Bild 6 dargestellten wärmetechnischen Kennwerte für ungeschütztes Gußeisen berechneten Oberflächentemperatur. Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Bauteiltemperaturen ist offensichtlich gut. Für die Versuchsstütze BS7 mit Dämmschichtbildner wurden die Oberflächentemperaturen unter Ansatz der thermischen Materialkennwerte nach Bild 6 (Gußeisen) und Bild 7 (DSB) berechnet und in Bild 17 aufgetragen. Die Übereinstimmung mit den Meßwerten ist ebenfalls gut.

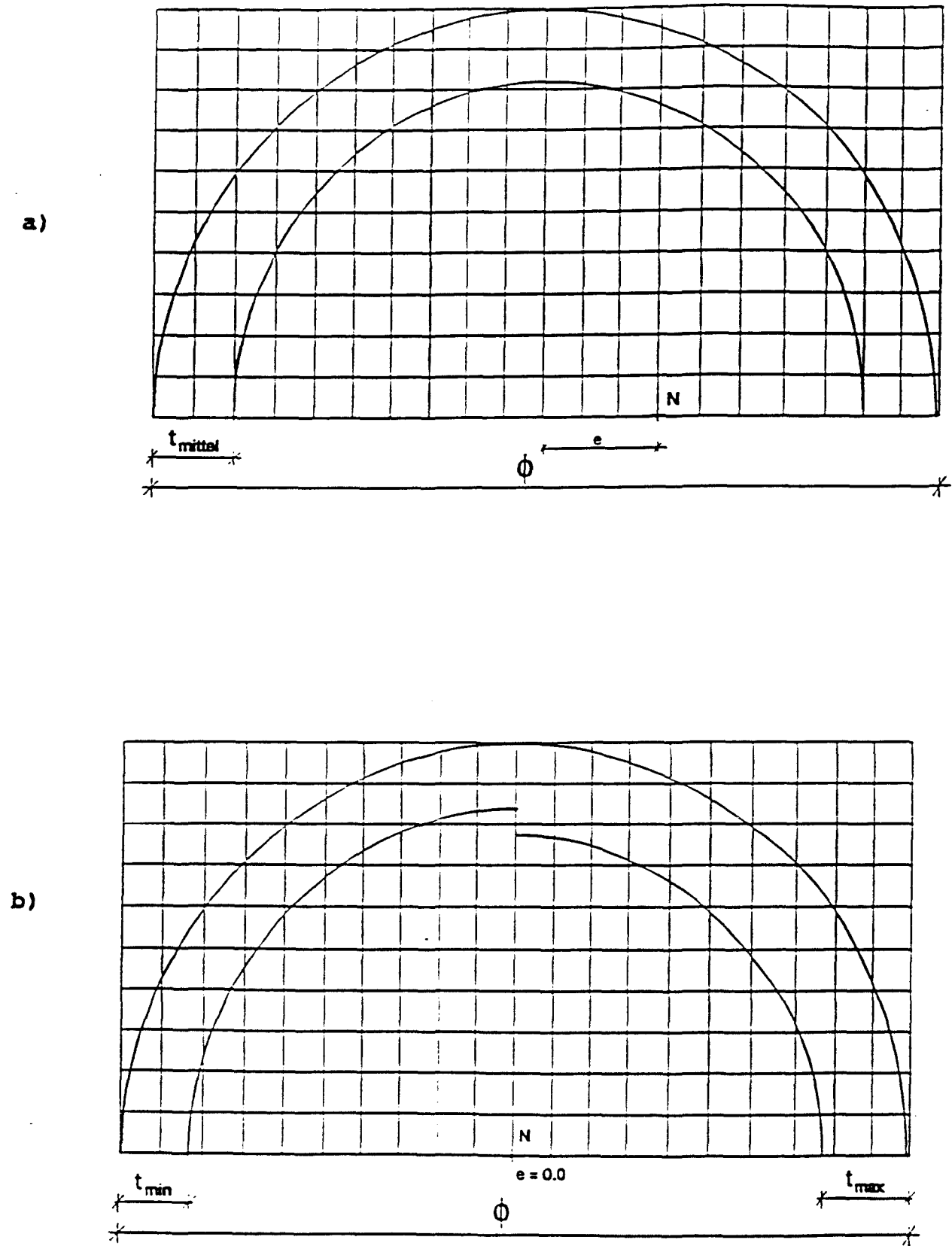


Bild 15 Näherungsansätze zur rechnerischen Erfassung der Querschnitts-Imperfektionen von Gußstützen

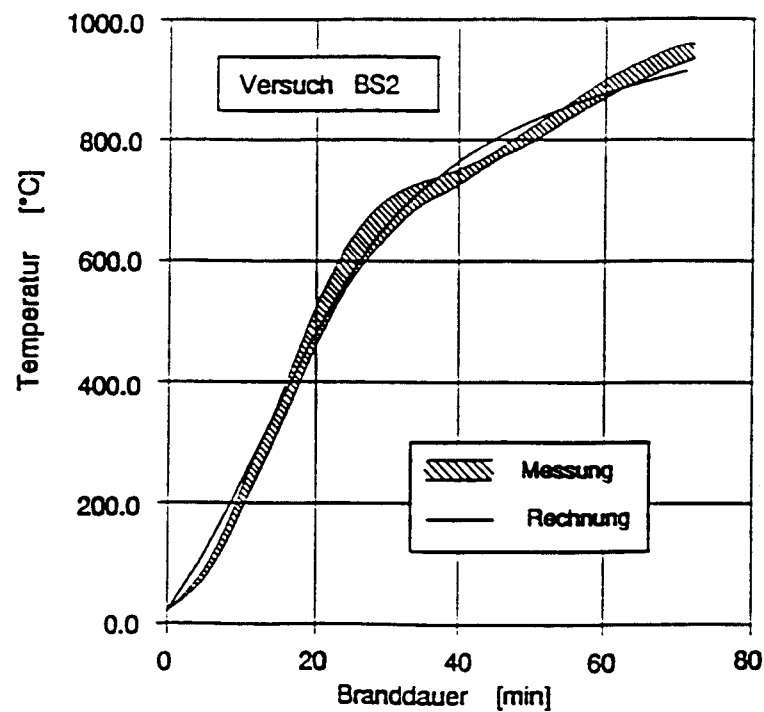


Bild 16 Oberflächentemperaturen der Versuchsstütze BS2 nach Versuch und Berechnung

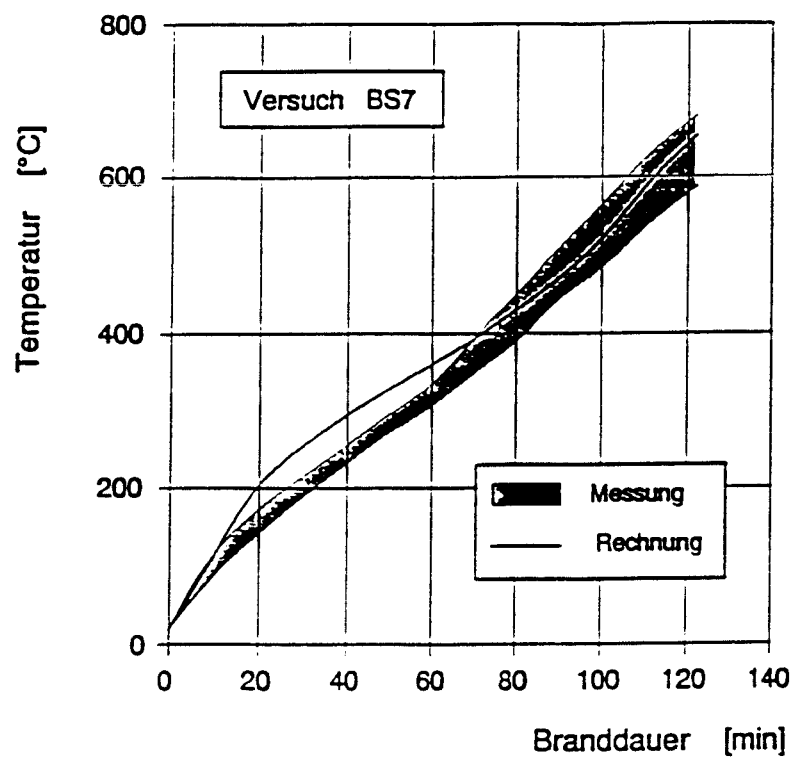


Bild 17 Oberflächentemperaturen der Versuchsstütze BS7 nach Versuch und Berechnung

Unter Ansatz der im ersten Berechnungsschritt ermittelten Querschnittstemperaturen wurde das Last-Verformungsverhalten der experimentell untersuchten Gußstützen simuliert. In Bild 18 ist beispielhaft für die Versuchsstütze BS3 die berechnete Vertikalverformung der im gemessenen gegenübergestellt. In der Berechnung versagte die Stütze durch Stabilitätsverlust. Der Versagenszeitpunkt entspricht in etwa dem Erreichen der maximalen vertikalen Ausdehnung der Stütze. Im Versuch tritt das Ausknicken der Stütze dagegen nicht schlagartig auf. Vielmehr wird mit anwachsender Horizontalausbiegung die Stütze zunehmend gestaucht, bis sie sich schließlich der Last entzieht. Die infolge der hohen Verformungsfähigkeit des Gußeisens besonders ausgeprägt Stützenstauchung kann vom Rechenprogramm nicht realistisch nachvollzogen werden.

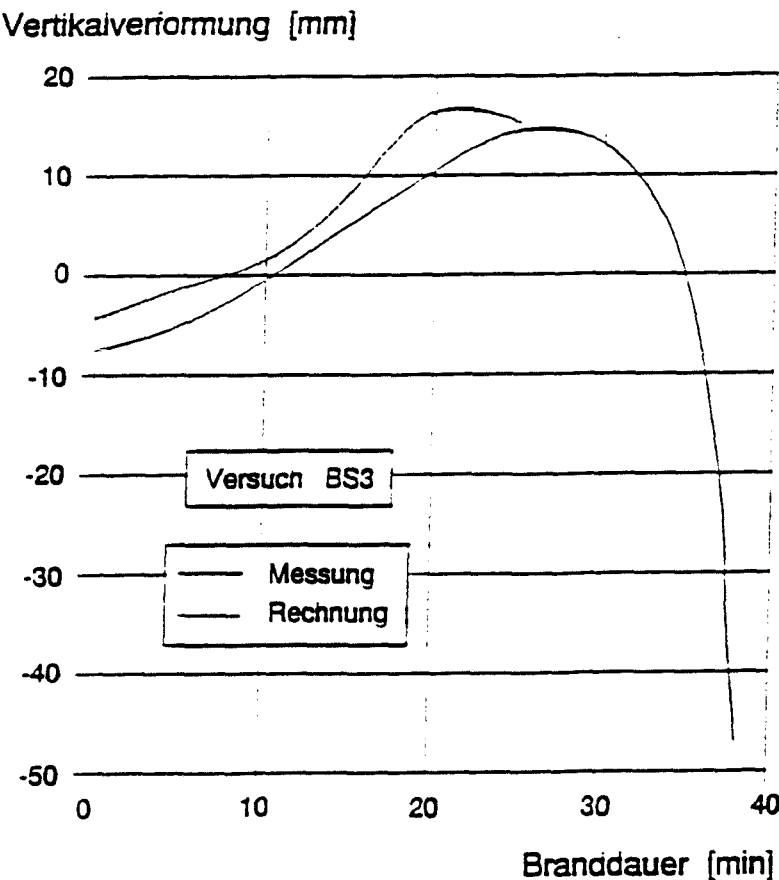


Bild 18 Berechnete und gemessene Vertikalverformung der
Versuchsstütze BS3

Bei der Gegenüberstellung von Rechnung und Messung wurden daher jeeils zwei Versagenskriterien verglichen:

- 1) t_u, T_u kennzeichnen den Zustand, bei dem die Versuchsstütze sich der Belastung entzog (Abfallen der Pressenlast).
- Vmax Vmax

2) t_u, T_u kennzeichnen die der maximalen Ausdehnung (also kurz vor dem rechnerischen Stabilitätsversagen) zugeordneten Versagenszeit bzw. -temperatur.

Die Versuchs- und Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Berechnung erfolgte für beide in Bild 15 dargestellten Ansätze zur Berücksichtigung der Querschnittsimperfektion der Gußstützen. Demnach geben beide Berechnungsansätze die Realität im Brandversuch offenbar recht gut wieder. Die Ergebnisse sind insgesamt konservativ, tendieren für das Versagenskriterium 1 (t_u, T_u) allerdings etwas stärker zur sicheren Seite.

Tabelle 5 Vergleich der Ergebnisse aus Versuch und Berechnung mit unterschiedlichen Annahmen zur Querschnittsimperfektion und zum Versagenskriterium

Stützenbezeichnung	Versuchsergebnisse nach Versagenskriterium				Rechenergebnisse FE mit Exzentrizität e				Rechenergebnisse FE mit Querschnittssprung			
	t_u (min)	T_u (°C)	t_u (min)	T_u (°C)	t_u (min)	T_u (°C)	t_u (min)	T_u (°C)	t_u (min)	T_u (°C)	t_u (min)	T_u (°C)
BS1	57	850	40	740	35	716	30	656	50	895	50	835
BS2	34	700	25	625	25	579	20	480	25	579	20	480
BS3	37	725	25	570	26	596	20	480	27	613	27	613
BS6	38	730	26	700	28	631	26	598	36	732	30	660
BS7	120	625	110	600	120	646	117	634	124	660	119	642
BS8	89	700	69	< 500	-	-	-	-	75	702	75	702
P4	24	600	22	563	25	537	22	478	30	621	22	478
P17	50	775	33	730	35	699	35	699	25	556	25	556

Im Bild 19 sind die gemessenen Versagenszeiten über den berechneten aufgetragen. Die oberen Diagramme zeigen, daß die Berechnungsergebnisse für das Versagenskriterium 1 (bei beiden Ansätzen für die Querschnittsimperfektion im Mittel um weit über 10 % auf der sicheren Seite liegen. Bei Anwendung des Versagenskriteriums 2 ist die Streuung geringer und die experimentelle Versagenszeit wird im Mittel besser nachvollzogen.

Abschließend kann festgestellt werden, daß es durch Herleitung von thermischen und mechanischen Kennwerten für Gußeisen in temperaturabhängiger Formulierung und deren Implementierung in das Rechenprogramm [5] gelungen ist, ein "exaktes" rechnerisches Verfahren bereitzustellen, mit dem das Tragverhalten von Gußstützen unter Brandbeanspruchung zutreffend simuliert werden kann.

8 VEREINFACHTES BEMESSUNGSVERFAHREN FÜR DIE PRAXIS

In der Praxis erfolgt die Beurteilung des Brandverhaltens von Bauteilen entweder nach DIN 4102 Teil 2 durch Brandversuche oder nach DIN 4102 Teil 4, in dem normungsfähige Bauteile aufgrund vorliegender Prüferfahrungen in Feuerwiderstandsklassen eingestuft worden sind. Erklärtes Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, auf der Grundlage der experimentellen und begleitenden theoretischen Arbeiten der Praxis einfache Bemessungstabellen für Regelfälle zur Verfügung zu stellen. Aus den Bemessungstabellen soll unter Beachtung der dort angegebenen Randbedingungen die Einstufung von Gußstützen in Feuerwiderstandsklassen ablesbar sein.

Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen wird der Feuerwiderstand von Gußstützen maßgeblich durch die Querschnittsabmessungen (Durchmesser, Wanddicke, U/A-Wert) und den Lastausnutzungsgrad bestimmt. Ungeschützte Gußstützen mit einem $U/A \leq 100 \text{ m}^{-1}$ erreichen bei voller Lastausnutzung nach DIN 1051 ($\alpha \approx 1,0$) eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Bei einer Reduzierung des Lastausnutzungsgrades auf $\alpha \leq 0,45$ läßt sich eine Feuerwiderstandsdauer

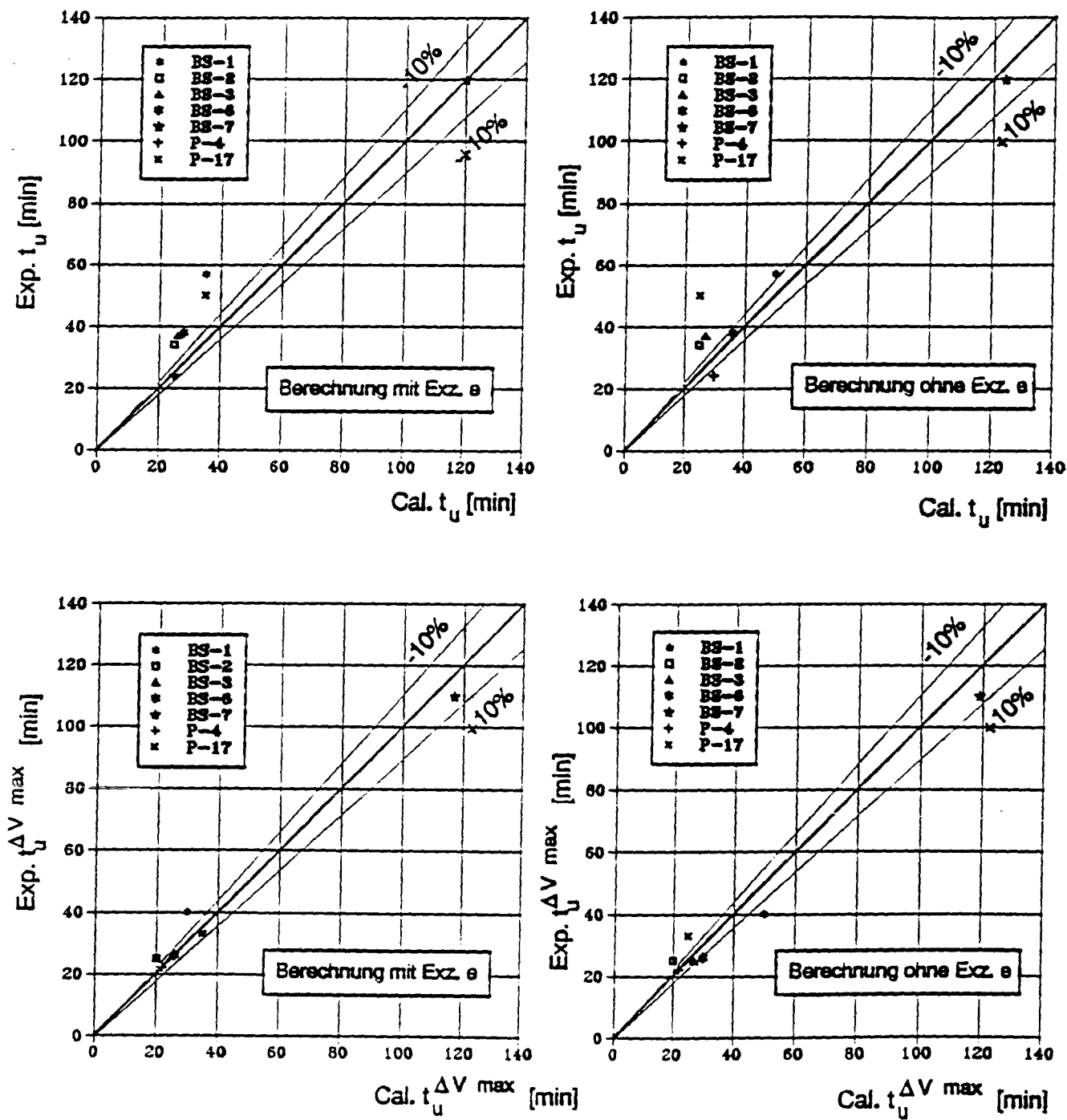


Bild 19 Vergleich der im Brandversuch ermittelten Versagenszeiten von Gußstützen mit den für unterschiedliche Ansätze der Querschnittsimperfektion und Versagenskriterien berechneten Werten

von 60 Minuten erzielen. Eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten läßt sich mit Hilfe von Ertüchtigungsmaßnahmen, z. B. Aufbringen eines dämmschichtbildenden Anstrichs, erreichen.

Nach Auswertung aller bislang vorliegenden Versuchsergebnisse wurde eine Bemessungstabelle für Gußstützen auf der Grundlage von DIN 4102 Teil 4 entwickelt (Tabelle 5).

Tabelle 5 Bemessungstabelle für gußeiserne Hohlprofilstützen in Abhängigkeit vom Lastausnutzungsfaktor und der Ertüchtigungsmaßnahme

Feuerwiderstandsdauer von Hohlprofil-Gußstützen mit $U/A \leq 100 \text{ m}^{-1}$ und $e/d \leq 0,06$ in Abhängigkeit vom Lastausnutzungsfaktor,						
	Feuerwiderstandsklasse					
	$F\ 30$ $N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{1)}$	$N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{2)}$	$F\ 60$ $N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{1)}$	$N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{2)}$	$F\ 90$ $N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{1)}$	$N_{\text{vorh}}/N_{\text{zul}}^{2)}$
Gußstütze ungeschützt	$\leq 1,0$	$\leq 0,35$	$\leq 0,45$	$\leq 0,10$	-	-
Betonver- füllte Gußstütze	$\leq 1,2$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,15$	-	-
Gußstütze mit DSB 3)	$\leq 1,0$	$\leq 0,50$	$\leq 1,0$	$\leq 0,35$	$\leq 0,70$	$\leq 0,25$

1) N_{zul} nach DIN 1051 [8]
2) N_{zul} nach Kapplein [7]
3) Voraussetzung: Zulassung für Hohlprofile Trockenschichtdicke $\geq 1 \text{ mm}$.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine große Anzahl von heute unter Denkmalschutz stehenden Gebäuden wurde vor der Jahrhundertwende erbaut. Die Gebäude wurden nach den Vorschriften, Normen und Bauordnungen der vergangenen Jahrzehnte und unter Verwendung der damals zur Verfügung stehenden Baustoffe errichtet. In vielen Gebäuden aus dem 19. Jahrhundert sind gußeiserne Stützen anzutreffen, über deren Verhalten unter Brandbeanspruchung bisher nur wenige Kenntnisse vorlagen.

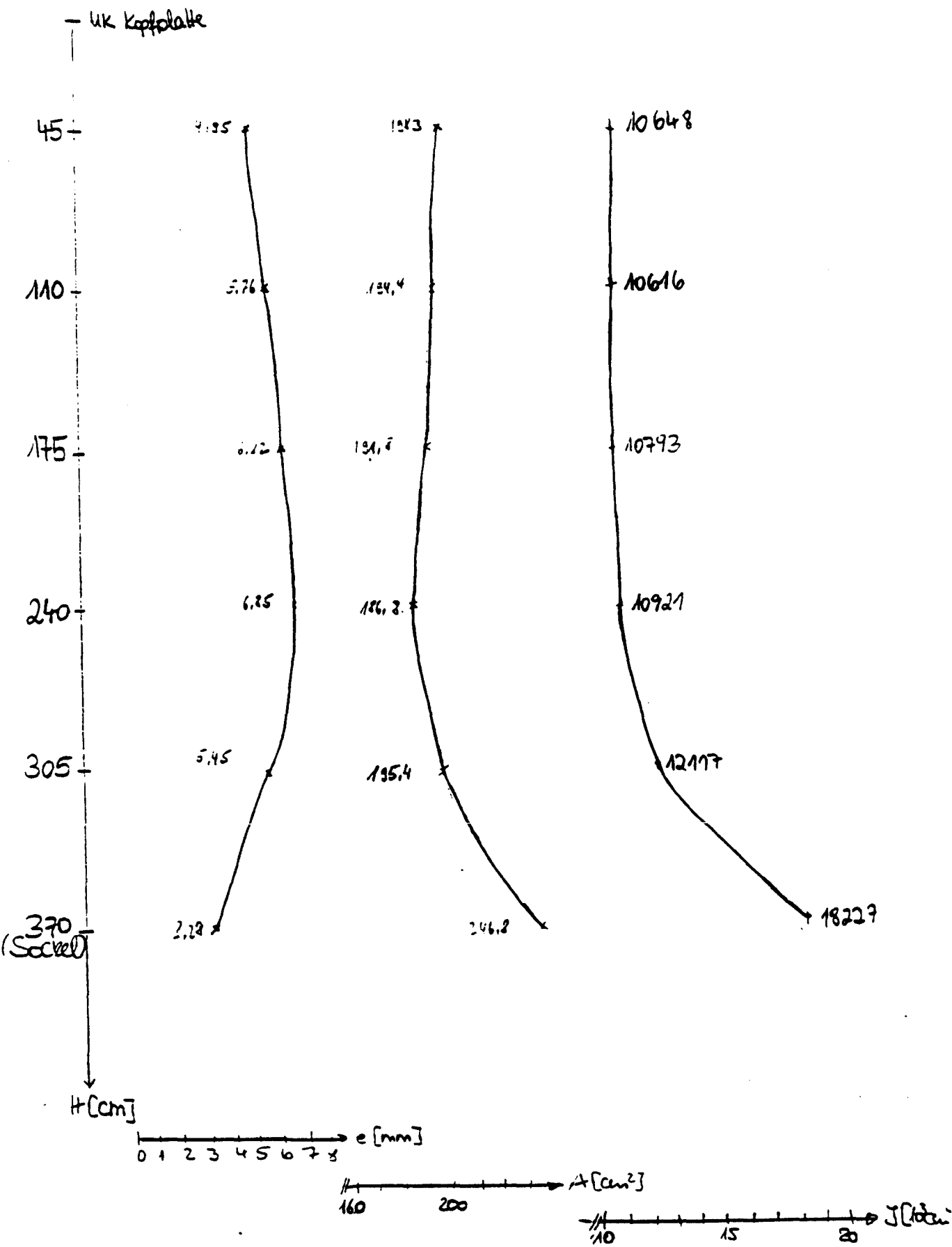
Um den Wissensstand über das Verhalten von gußeisernen Bauteilen unter Brandbeanspruchung zu erweitern, wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig eine Reihe von experimentellen Untersuchungen an Kleinproben zur Ermittlung von temperaturabhängigen wärmetechnischen Kennwerten und Werkstoffgesetzen sowie Brandversuche nach DIN 4102 Teil 2 an geschoßhohen Gußstützen zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer unter ETK-Temperaturbeanspruchung durchgeführt. Die Versuche wurden durch theoretische und rechnerische Untersuchungen begleitet.

Durch die Arbeiten ist es gelungen, ein "genaues" rechnerisches Verfahren zu entwickeln, mit dem das Tragverhalten von Gußstützen unter Brandbeanspruchung zuverlässig bestimmt werden kann. Auf der Grundlage der experimentellen Untersuchungen und der gewählten Erweiterung der Prüfergebnisse durch systematische Berechnungen können der Baupraxis einfache Bemessungstabellen für Regelfälle zur Verfügung gestellt werden.

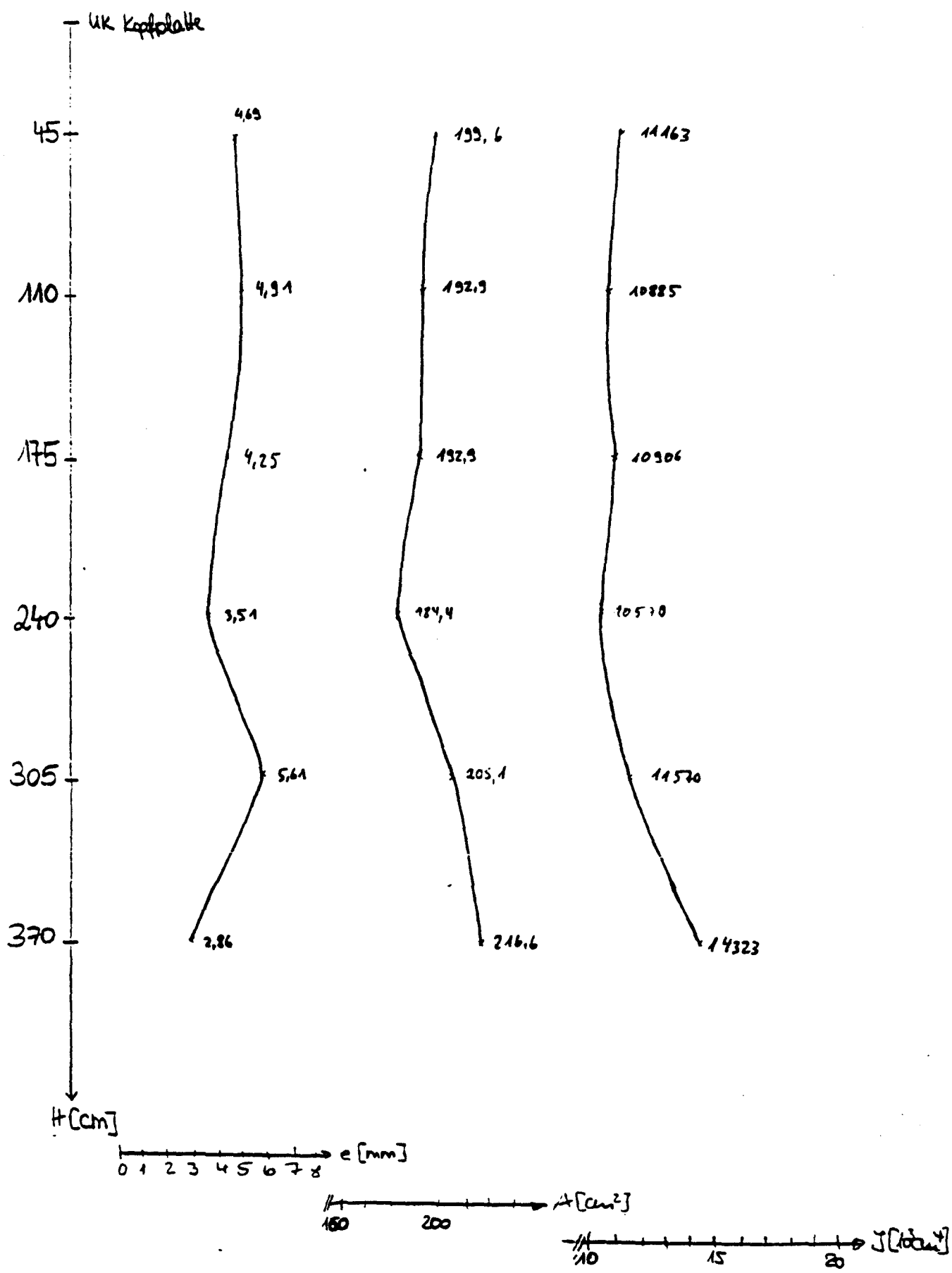
10 LITERATURHINWEISE

- [1] Hoffend, F.: Tragverhalten von gußeisernen Stützen unter Brandbeanspruchung. Bericht im Auftrag des Ministers für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB 1-72.02-Nr. 187/85), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Dezember 1986

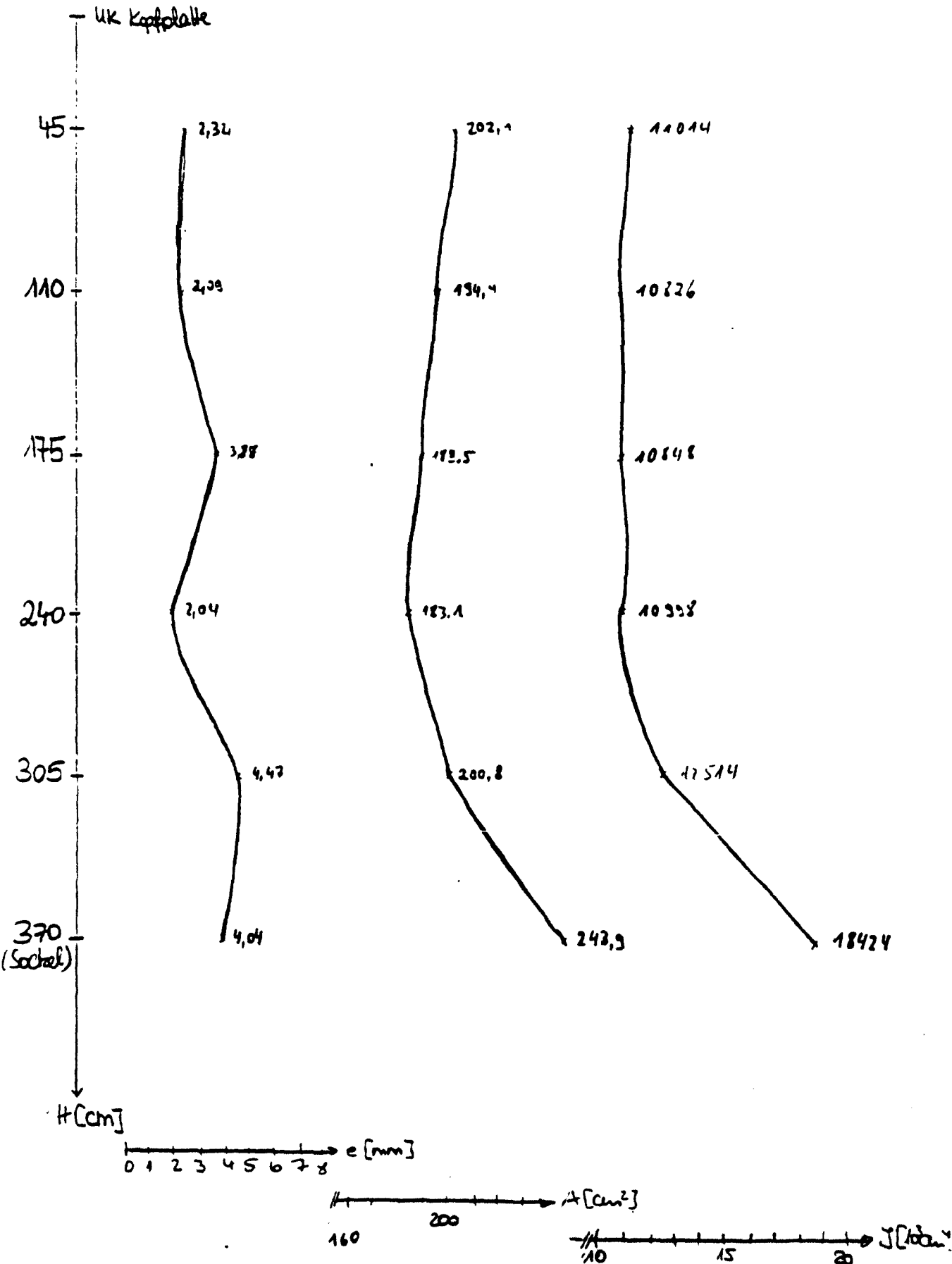
- [2] Falkner, H., Nause, P., Rohling, A.: Brandverhalten von gußeisernen Stützen, Bericht im Auftrag des Ministers für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB 1-72.02-Nr. 200/88), Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Juli 1990
- [3] Hosser, D., Nause, P., Rohling, A.: Brandschutzmaßnahmen für Gußstützen. Bericht im Auftrag des Sonderforschungsbereiches 315 "Erhaltung historisch bedeutsamer Bauwerke" Universität Karlsruhe, 1994
- [4] Nause, P., Rohling, A.: Untersuchungen zum Brandverhalten von Gußeisernen Stützen, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, September 1993
- [5] Quast, U., Haß, R., Rudolph, K.: STABA-F; Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff; Braunschweig, März 1984
- [6] Ahnert, R., Krause, K. H.: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960, Band II, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1988
- [7] Käpplein, R.: Zur Beurteilung des Tragverhaltens alter gußeiserner Hohlensäulen, Dissertation Karlsruhe 1991
- [8] DIN 1051, Ausgabe Februar 1937, Berechnungsgrundlagen für Grauguß im Hochbau
- [9] Wagner, K.: Brandverhalten und Brandschutzmaßnahmen von Gußeisensäulen, Dissertation TU Wien 1992
- [10] Ruge J., Linnemann, R.: Eigenschaften von Bau-, Beton- und Spannstahl bei erhöhter Temperatur, SFB 148, Abschlußkolloquium "Bauwerke unter Brandeinwirkung", Technische Universität Braunschweig, 1987.



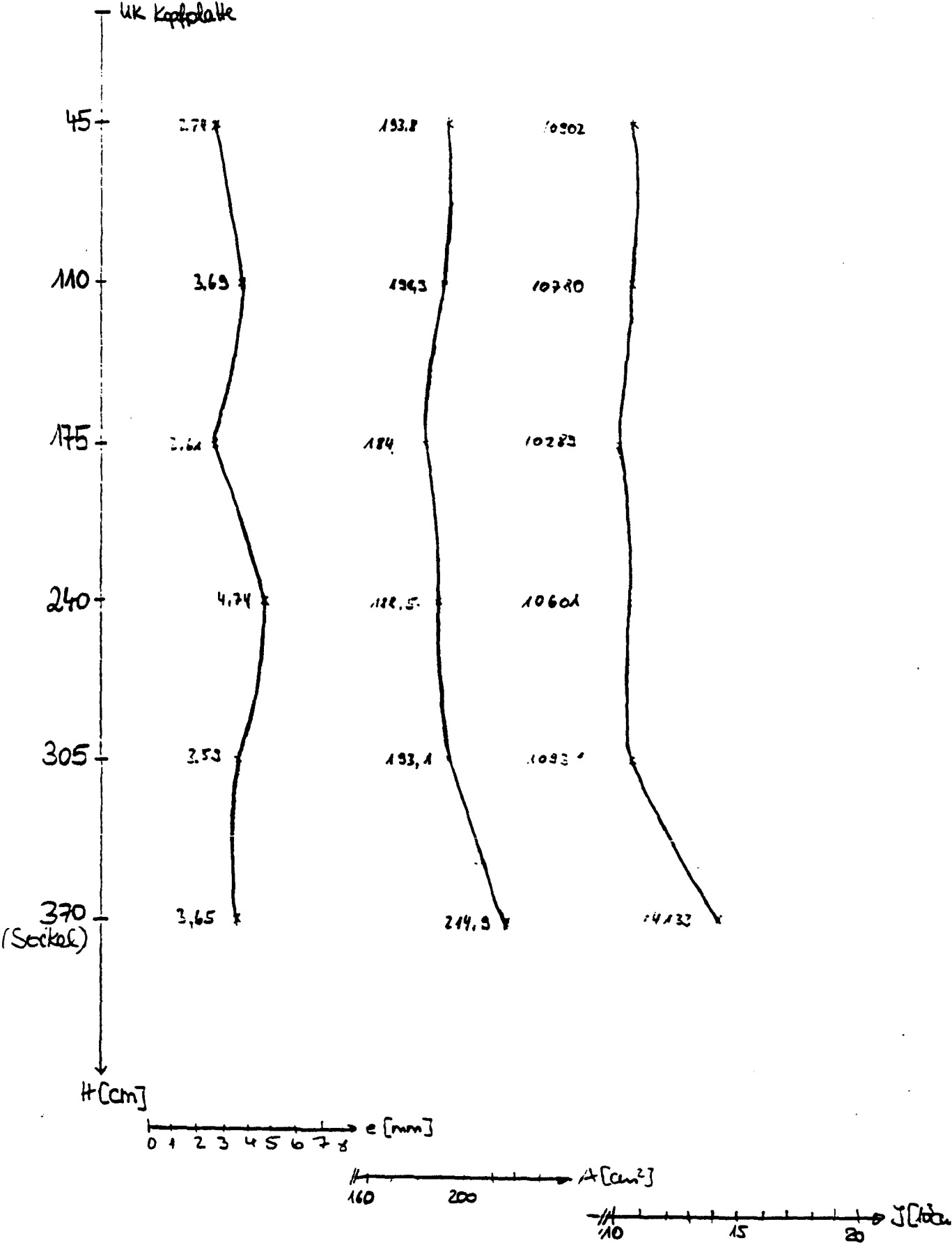
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS1



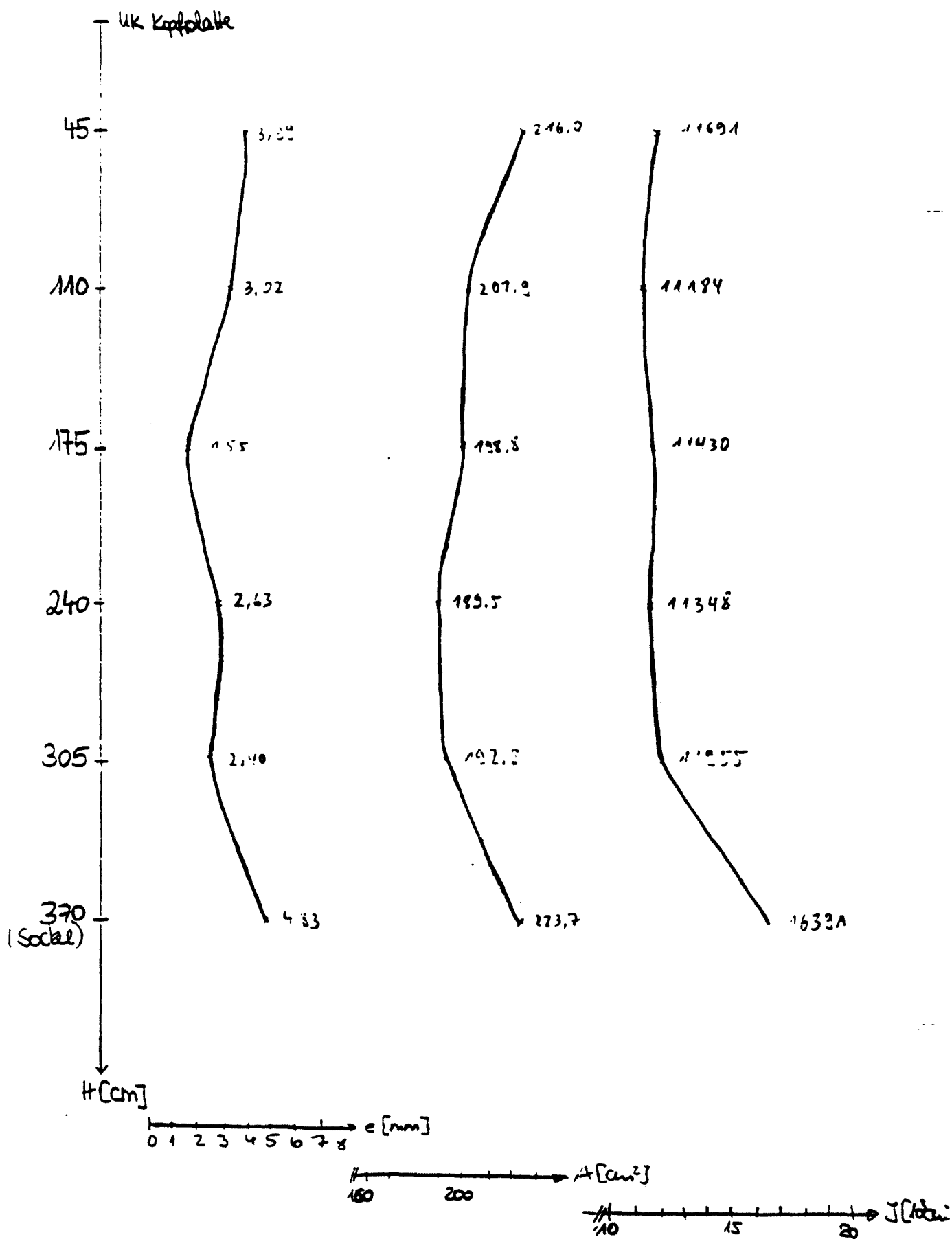
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS2



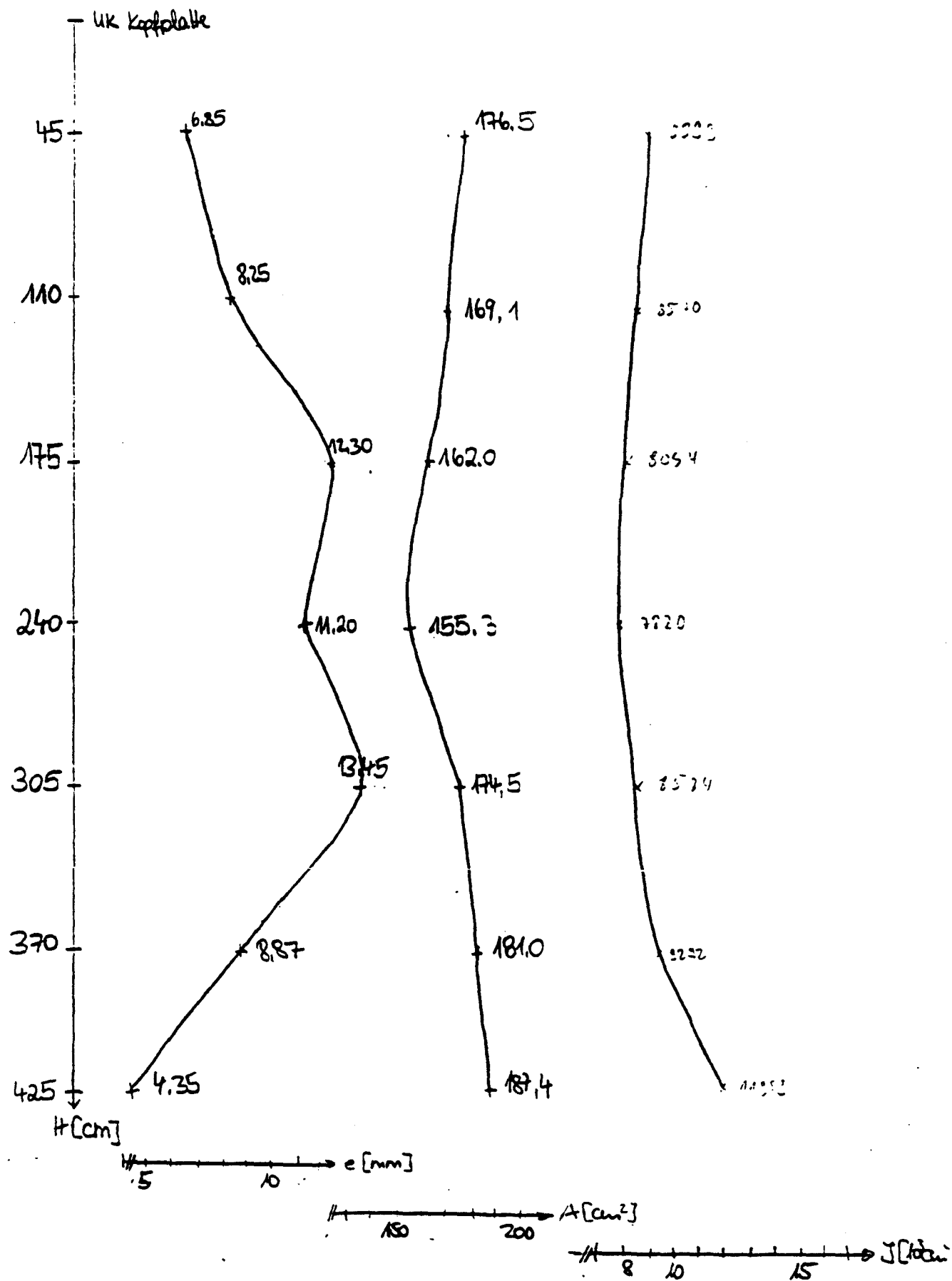
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS3



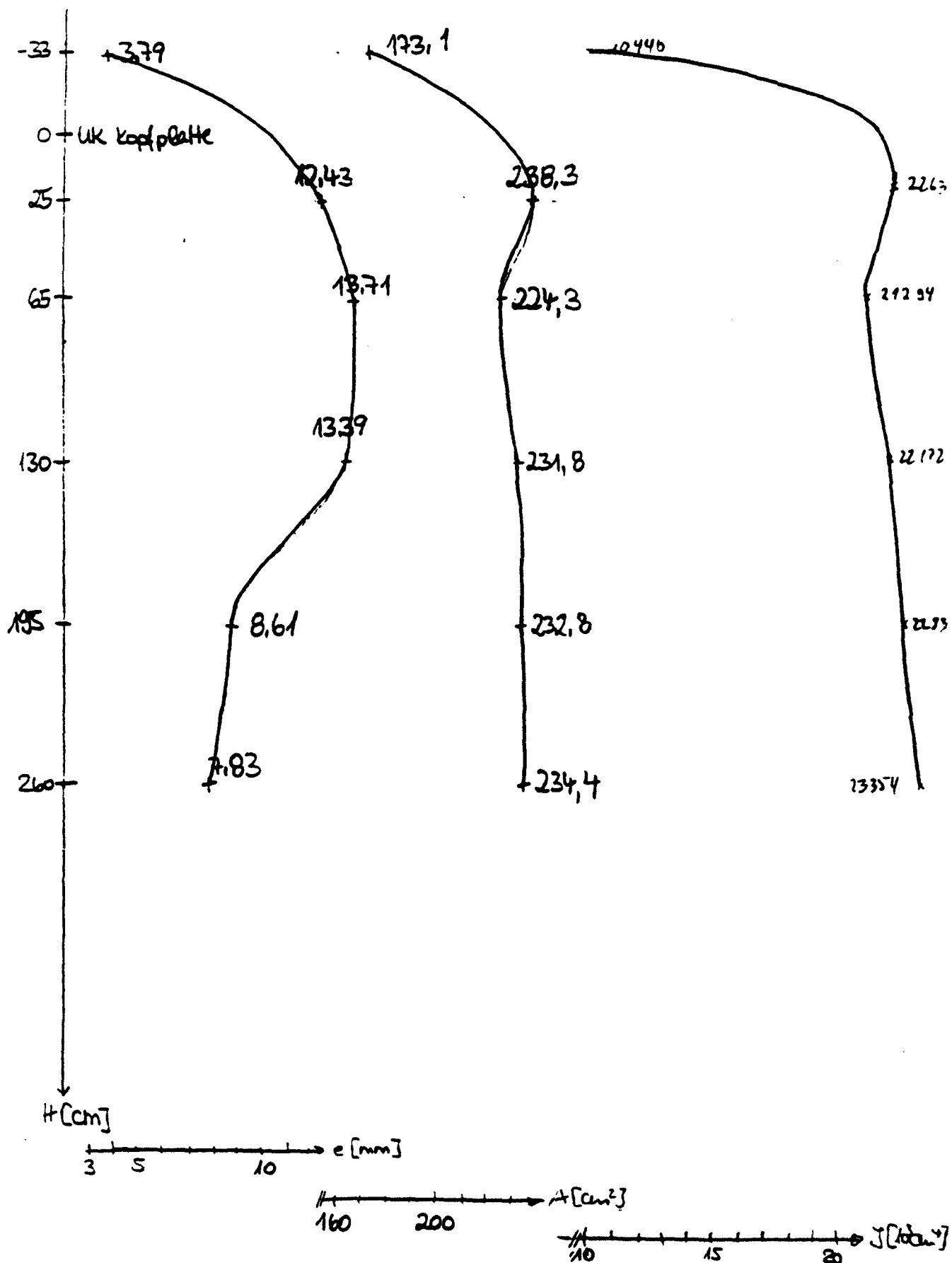
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS4



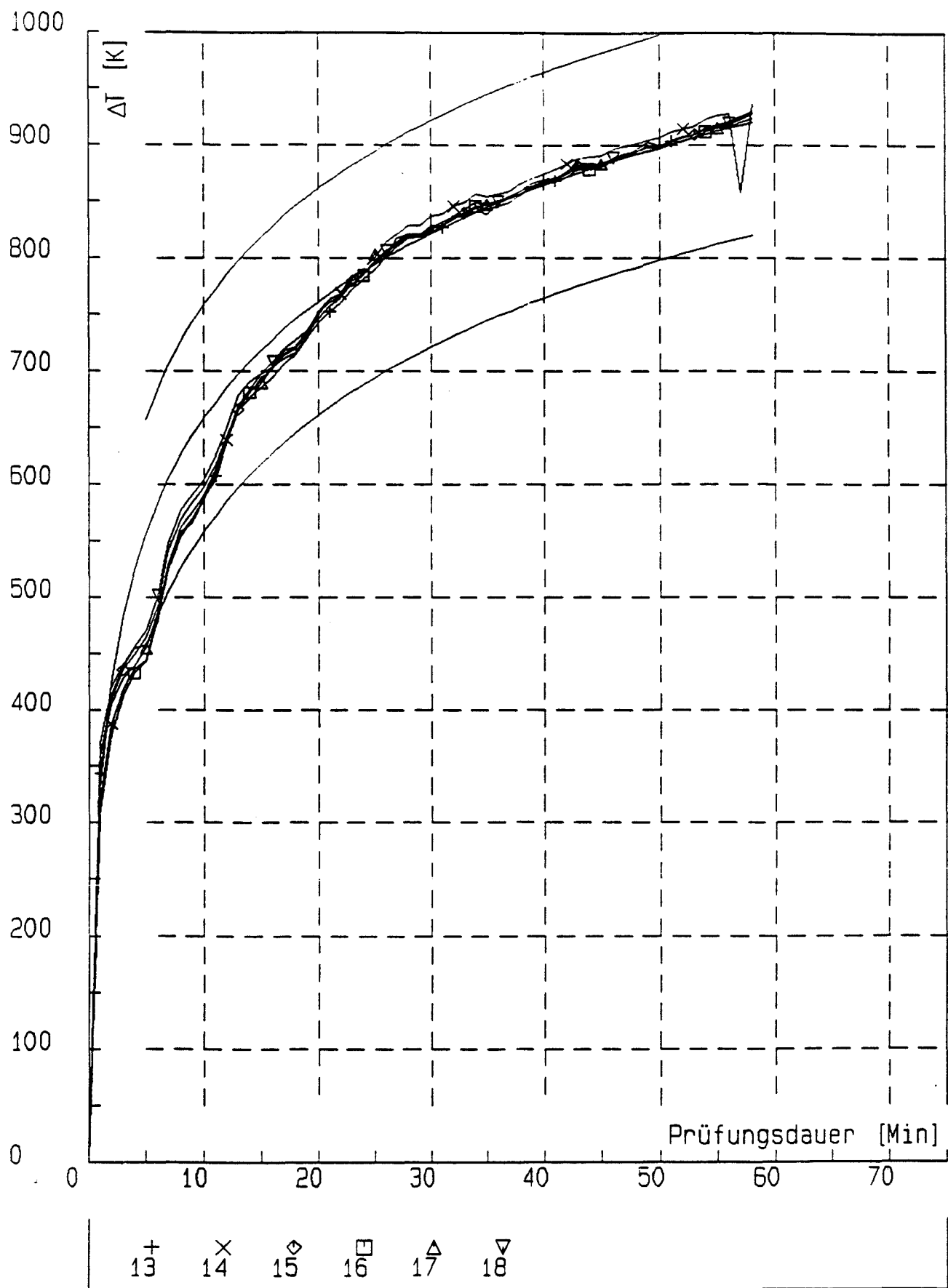
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS5



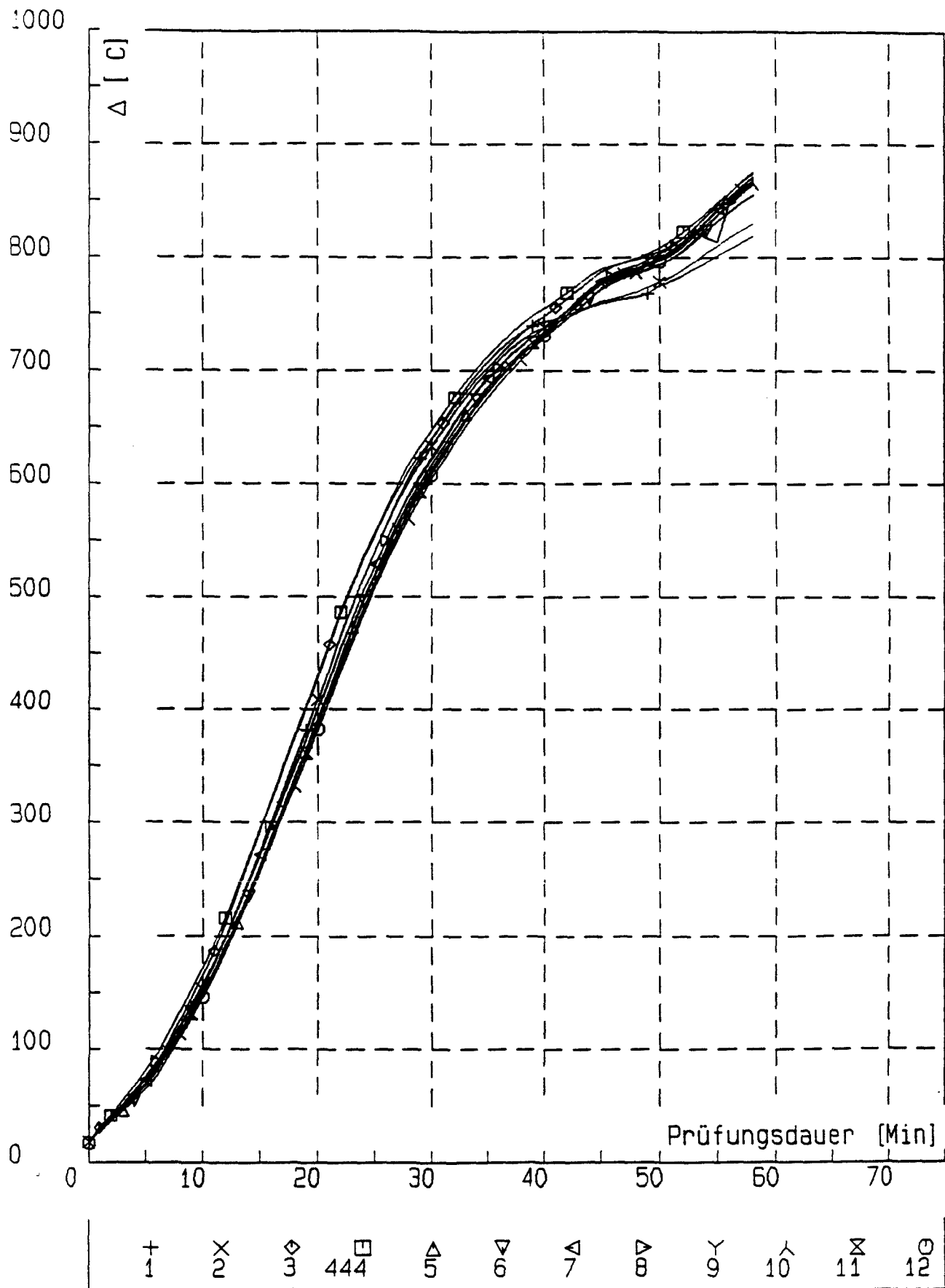
Querschnittswerte der Versuchsstütze BS6



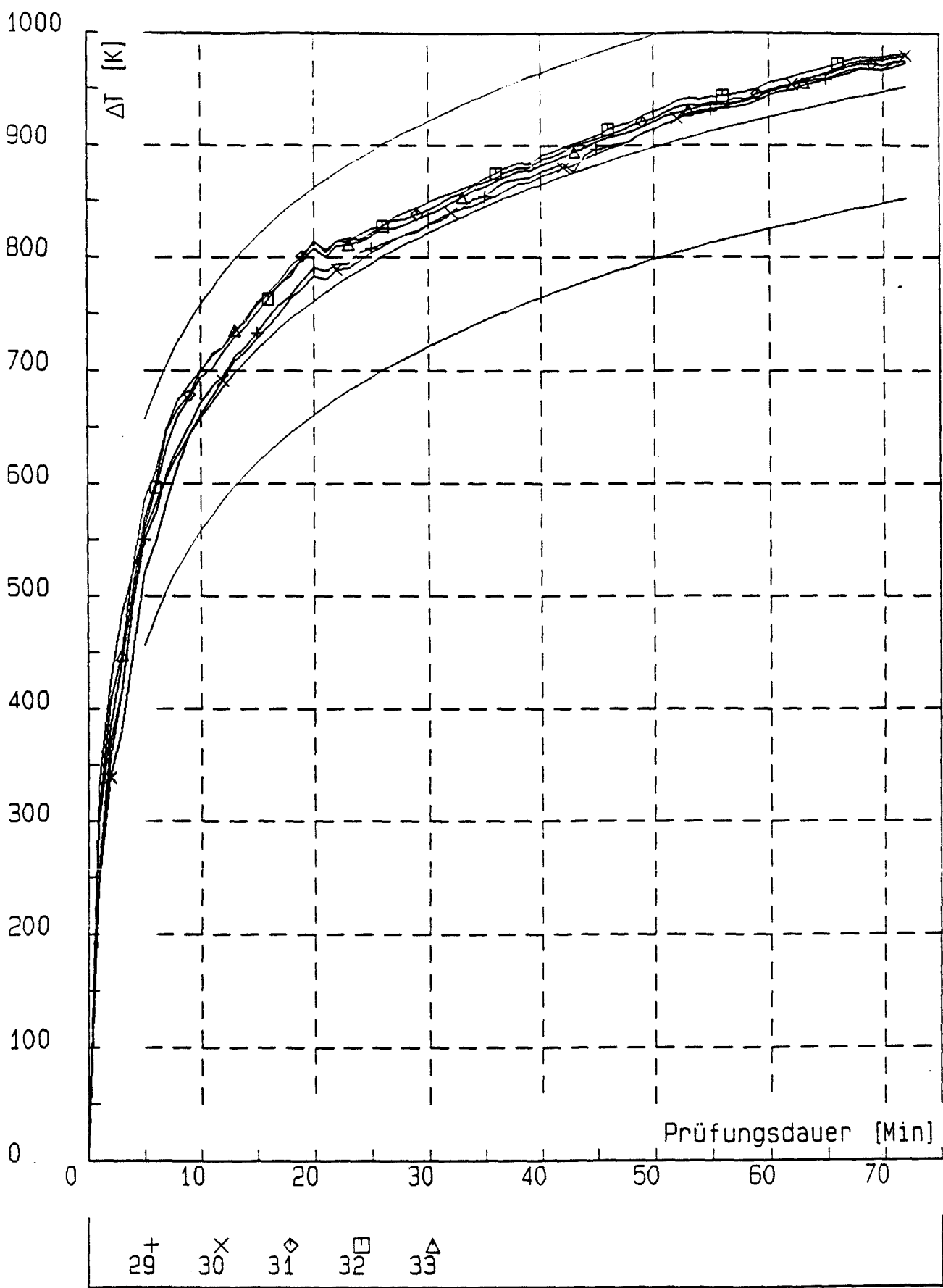
Querschnittswerte der Versuchsstütze P17



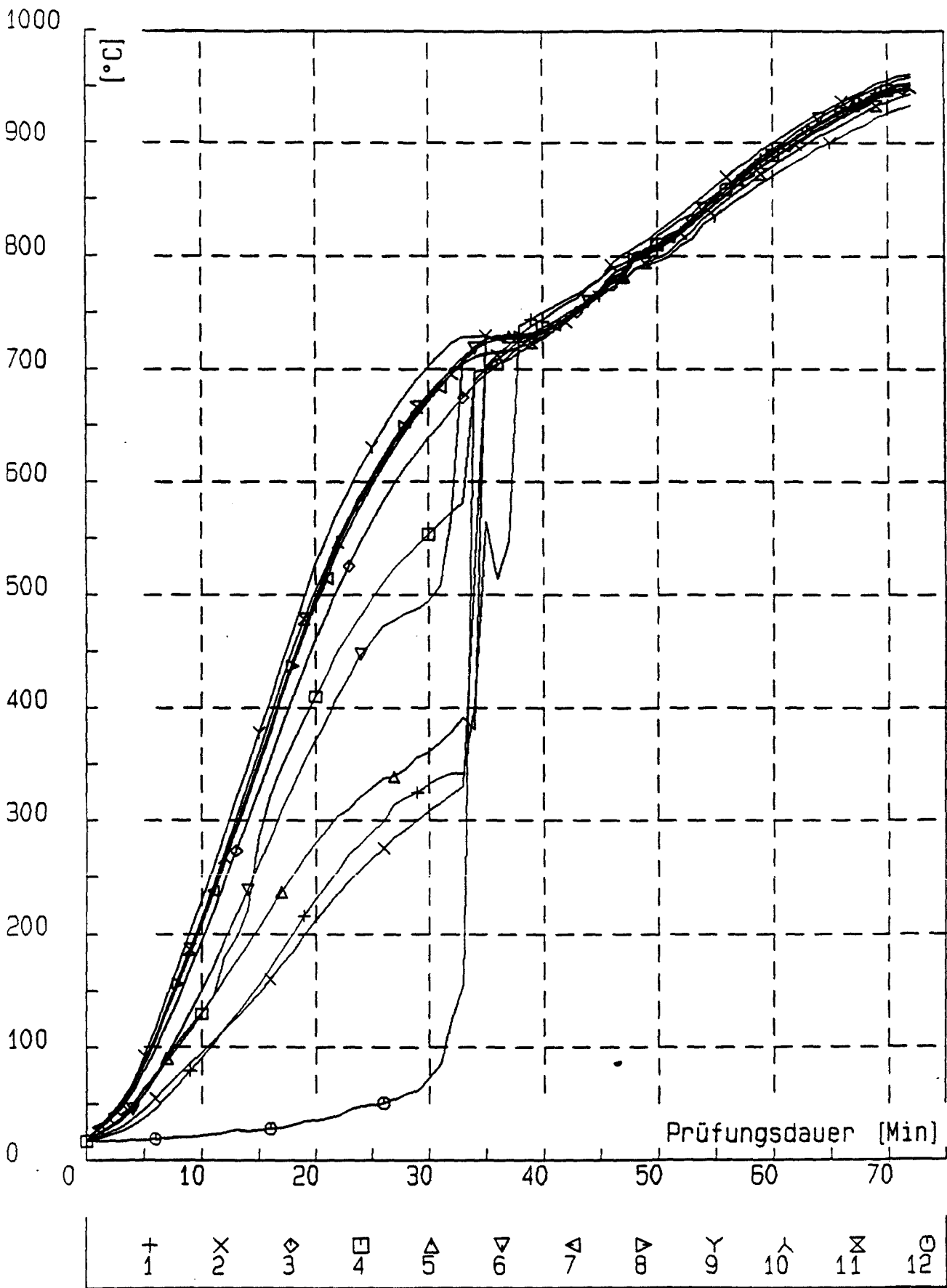
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS1



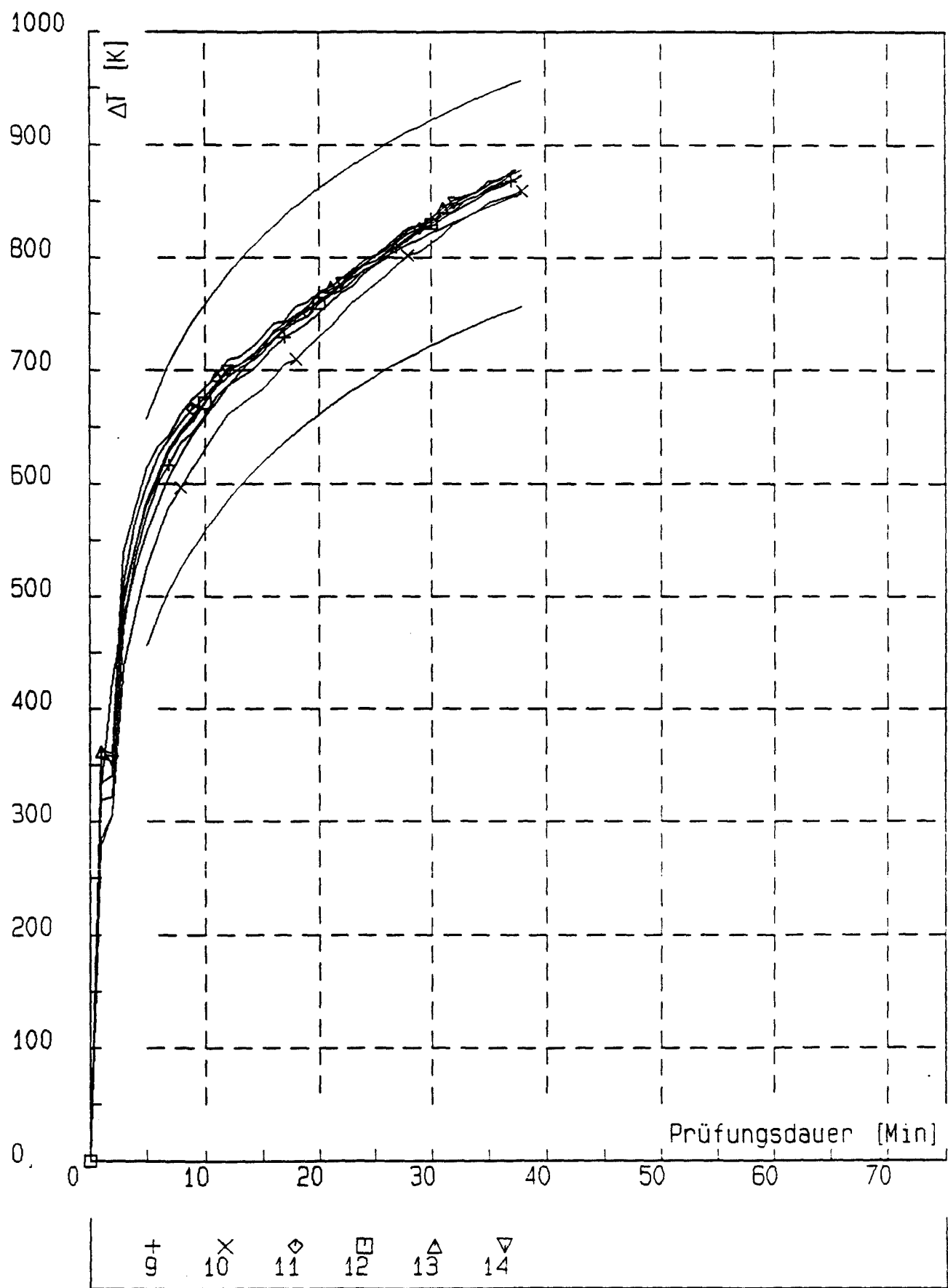
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS1



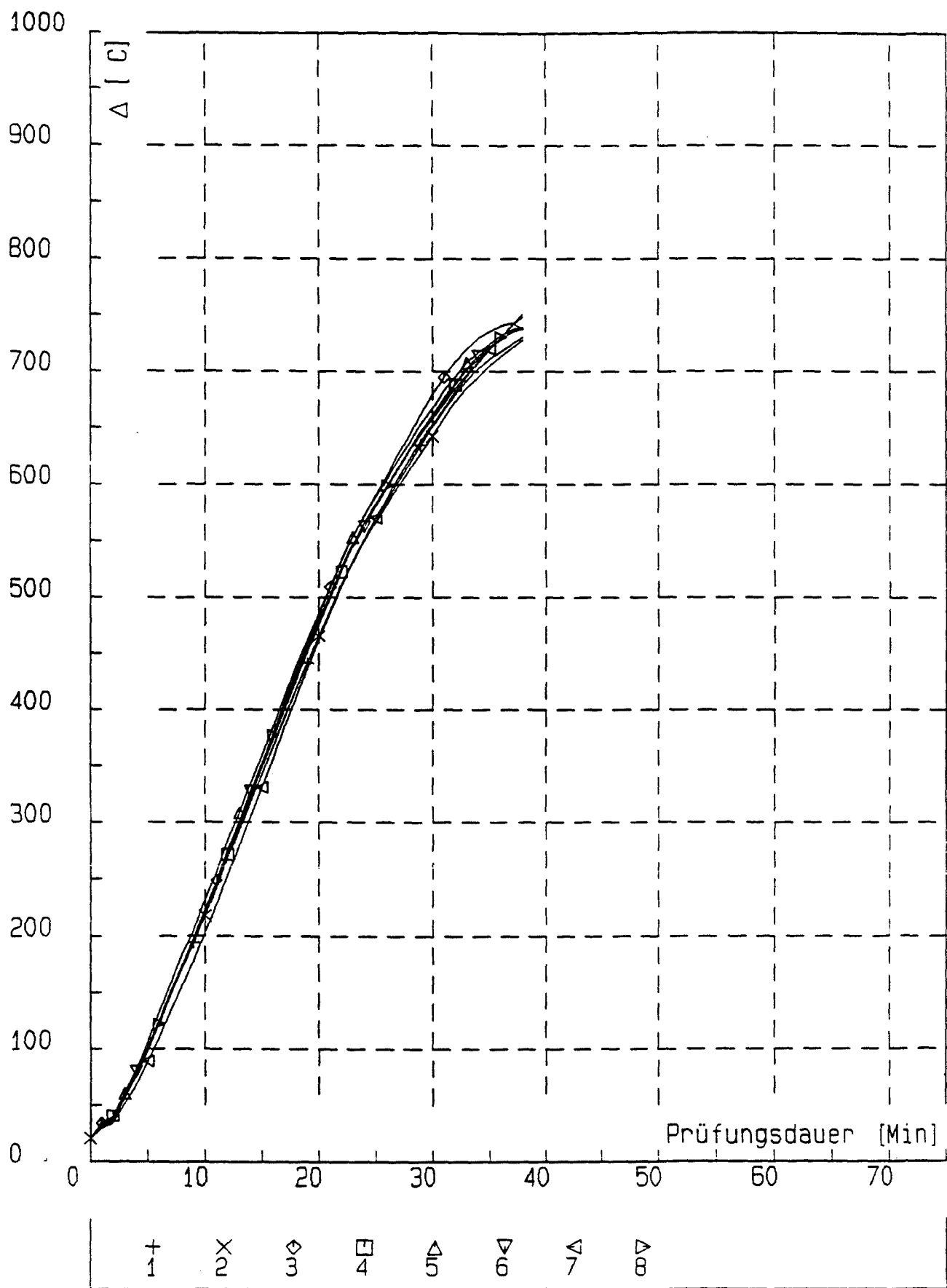
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS2



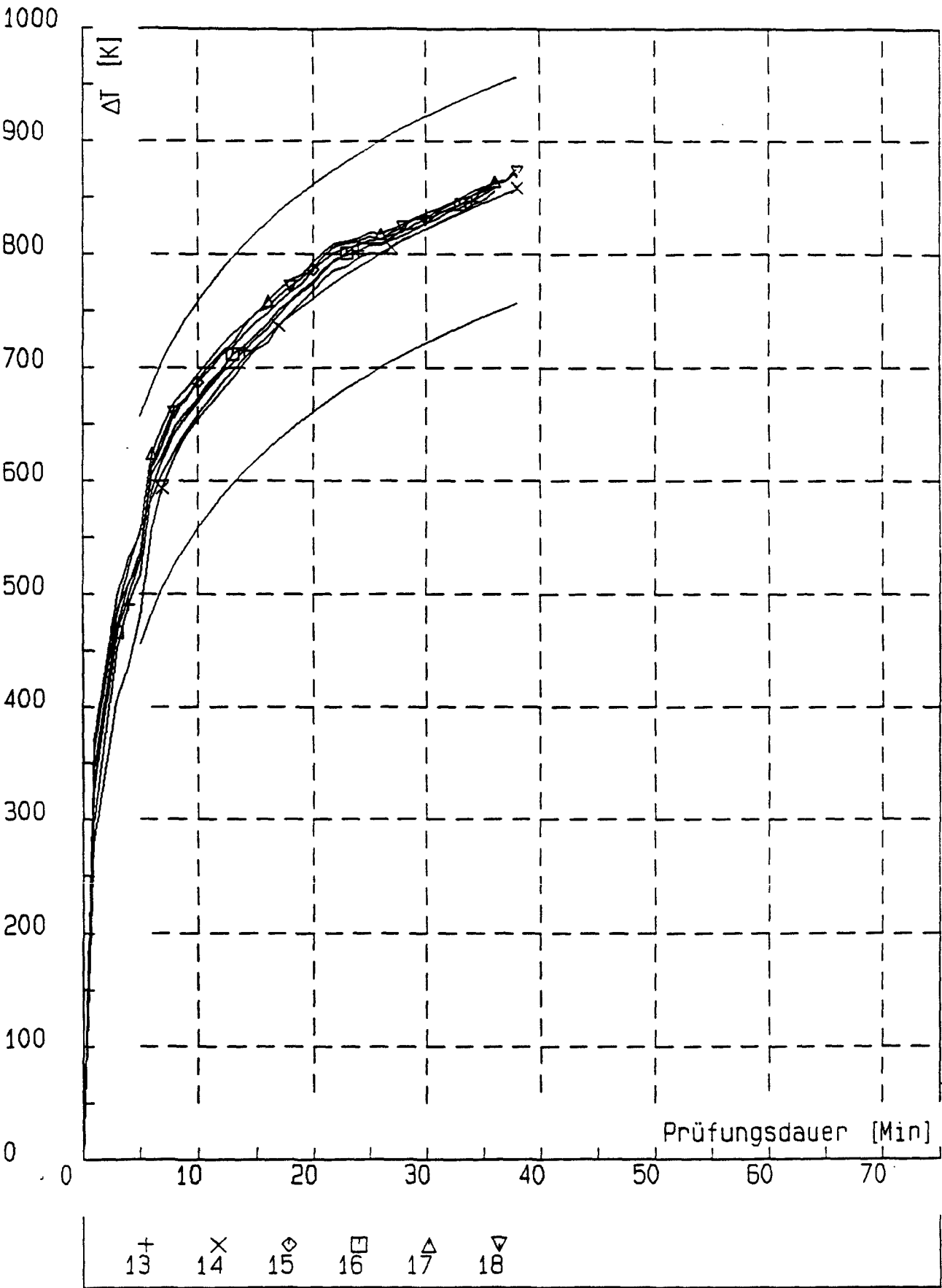
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS2



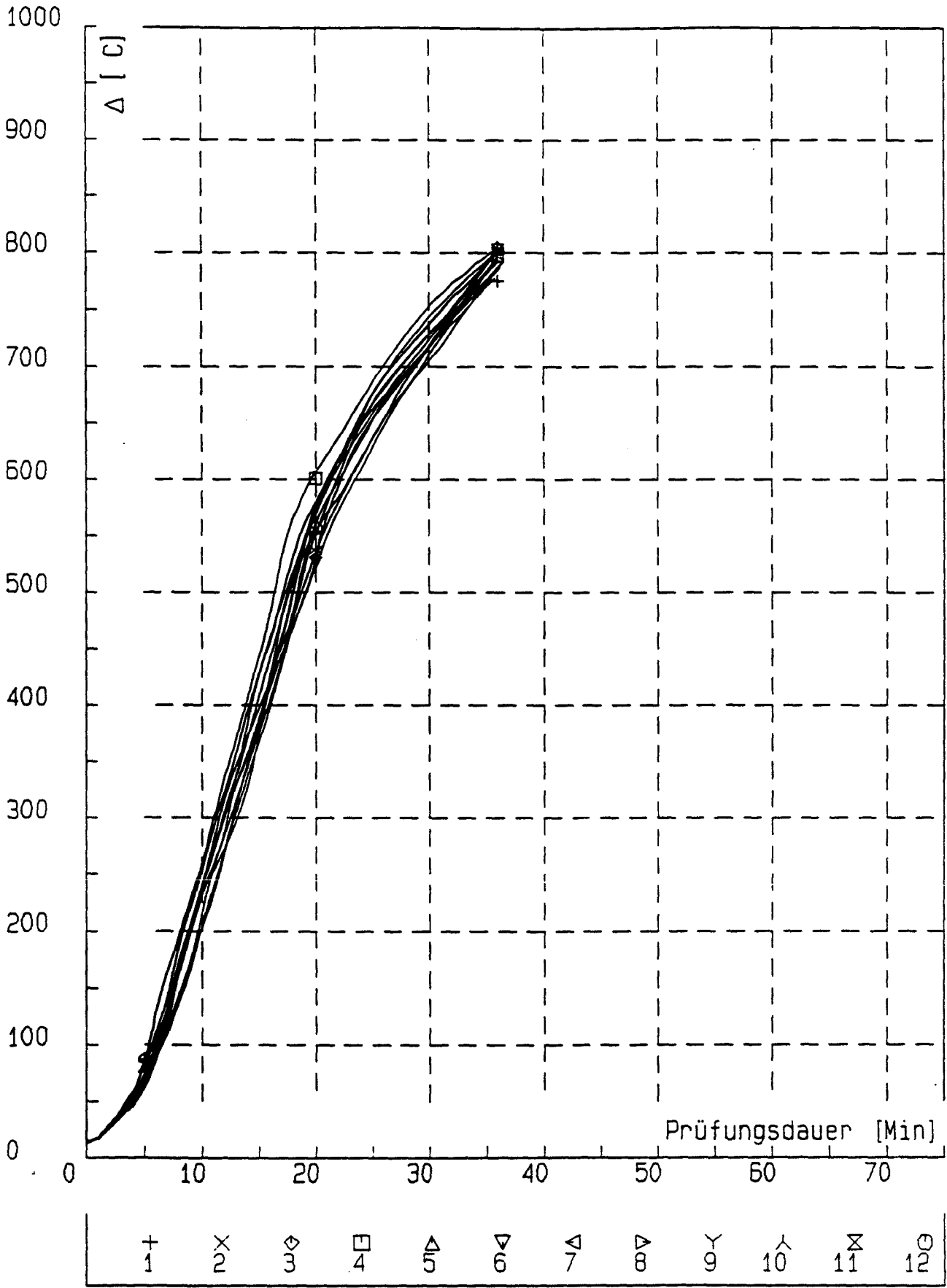
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS3



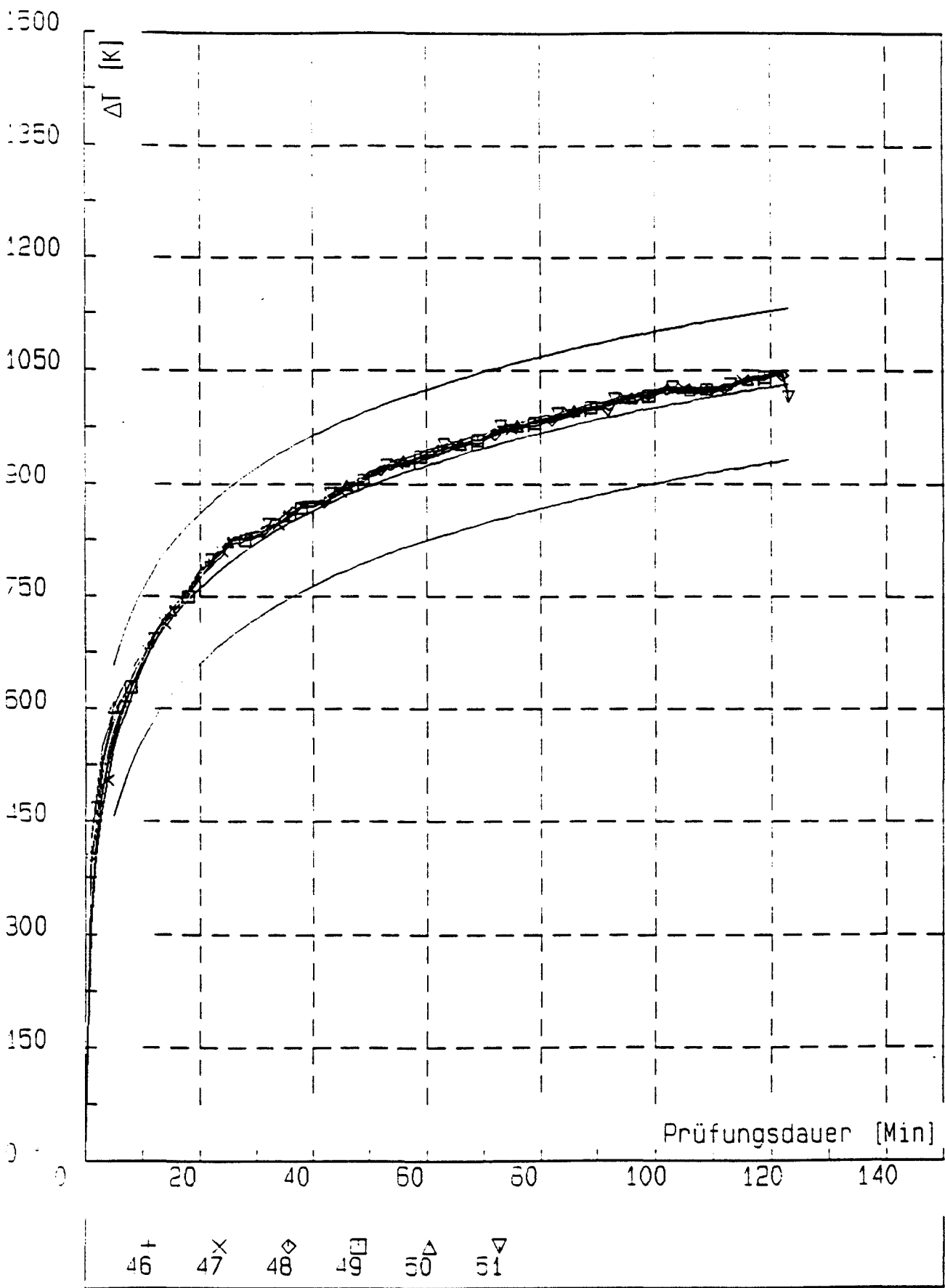
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS3



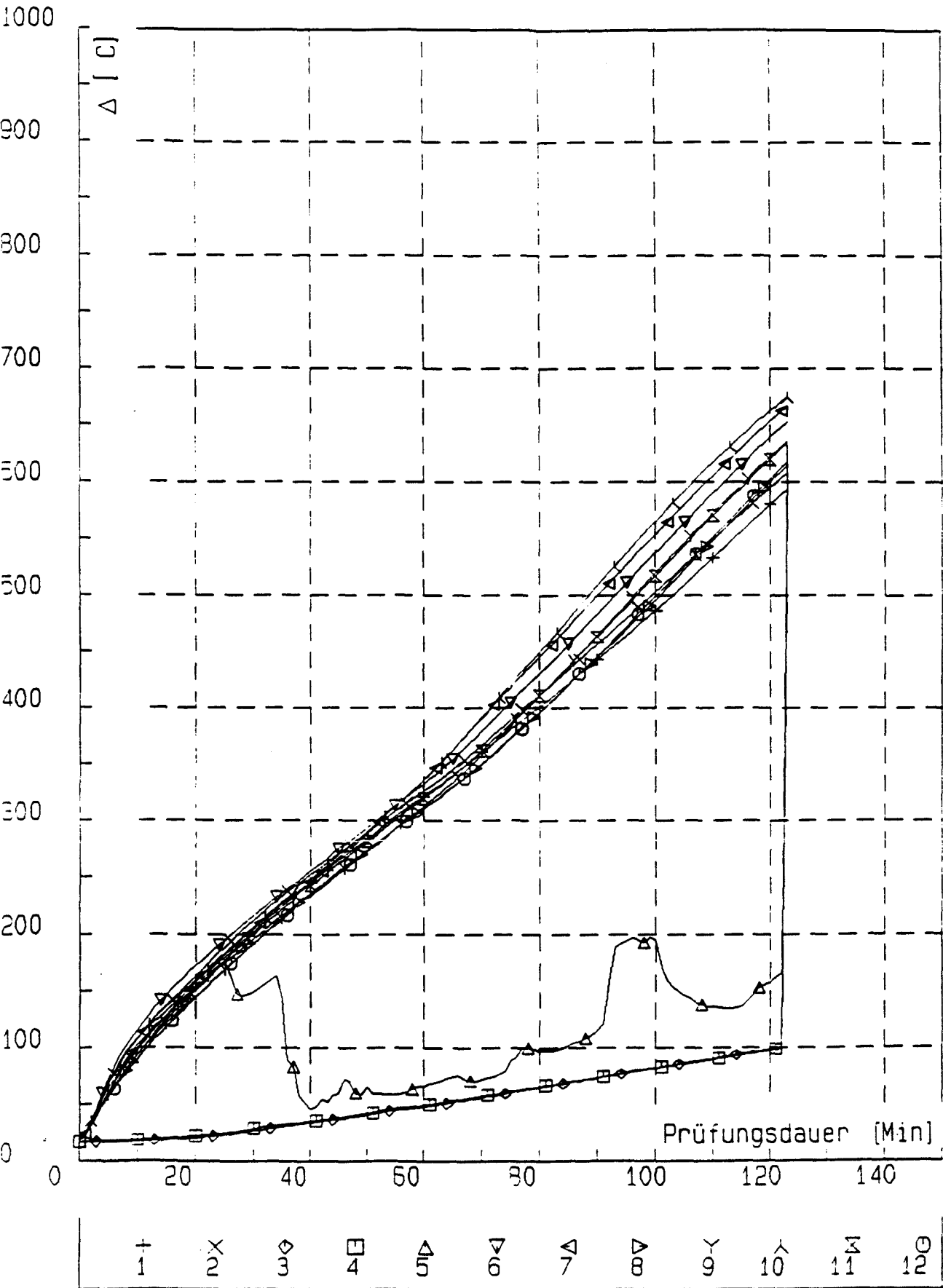
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS6



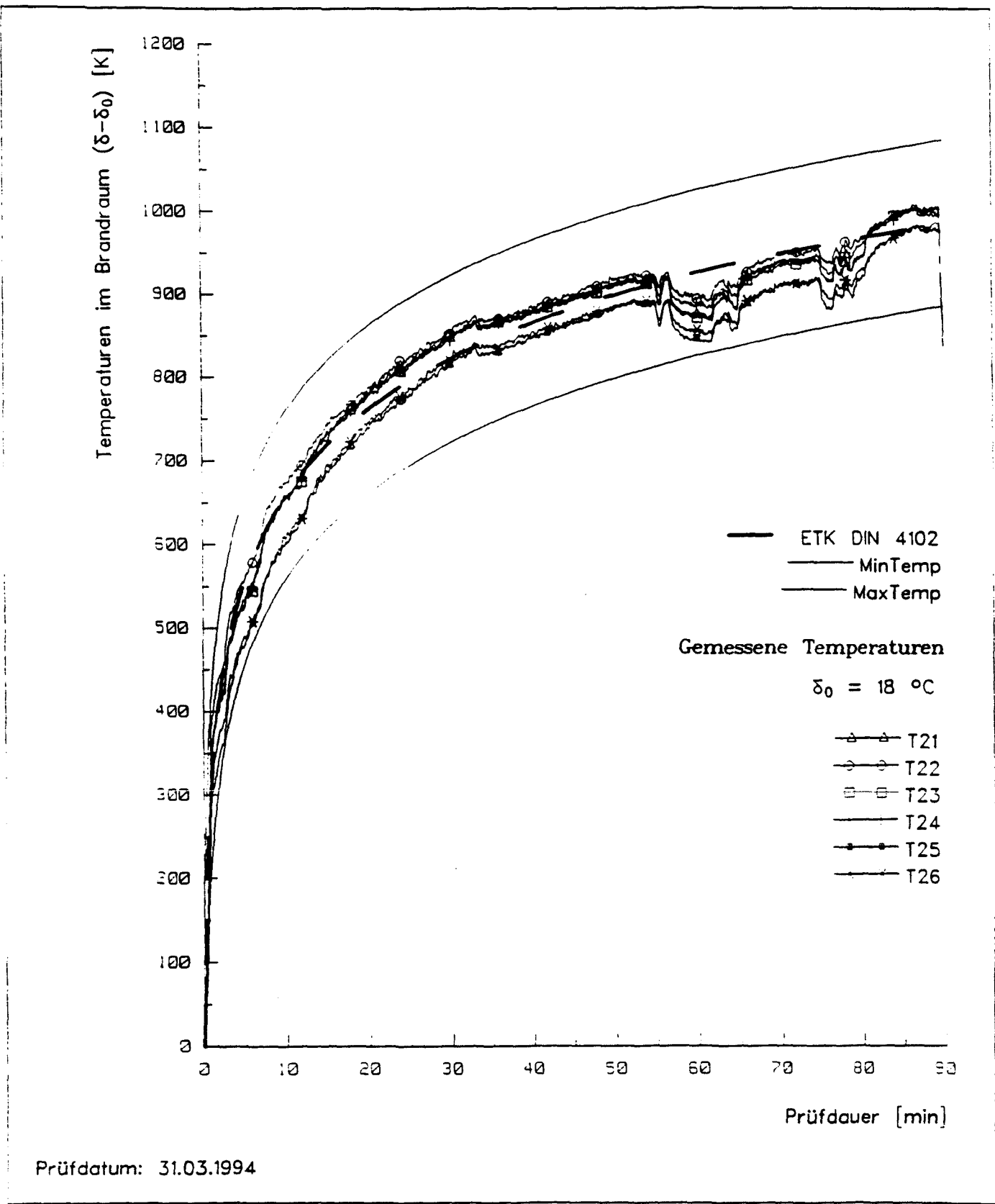
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS6



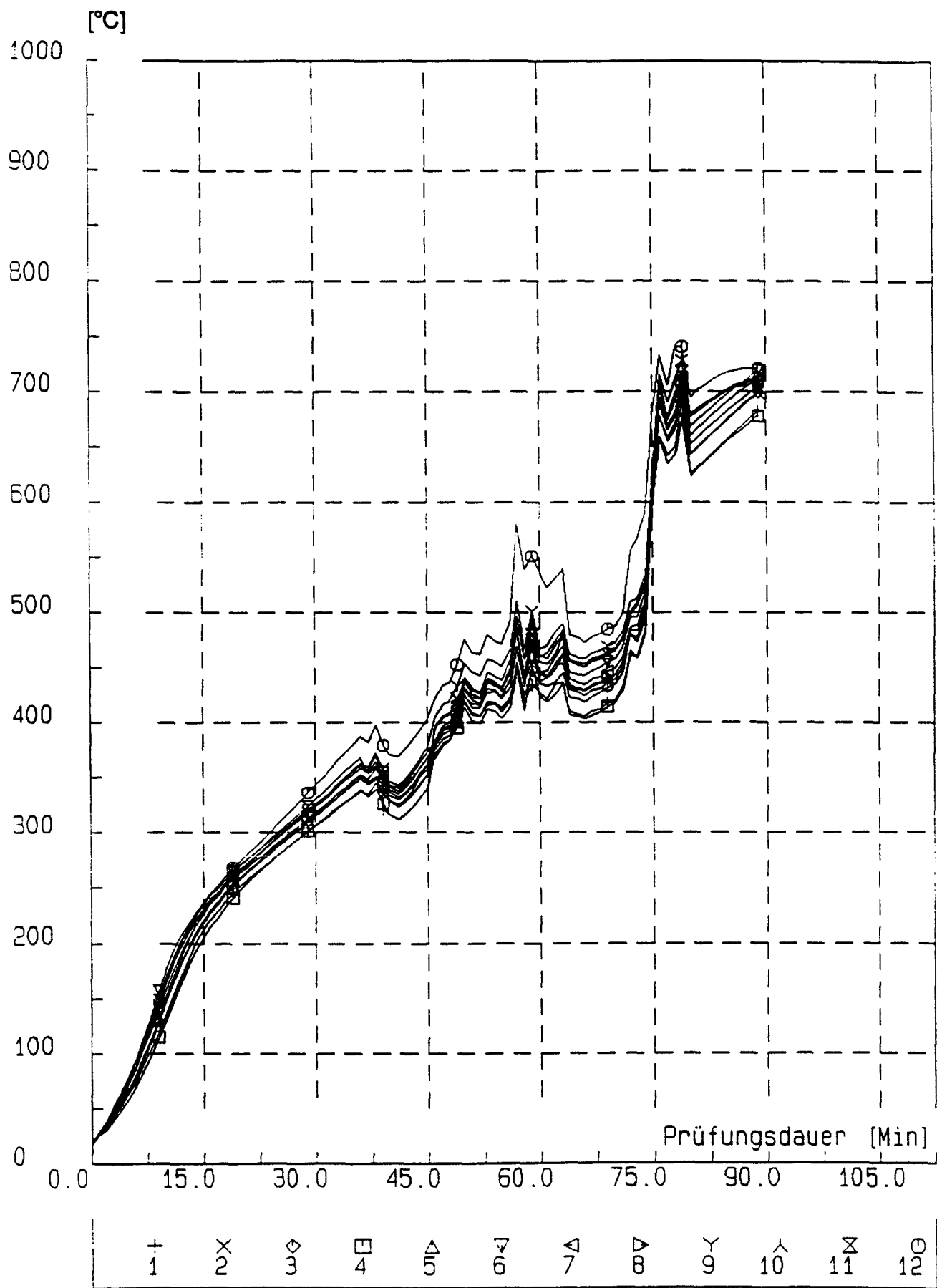
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS7



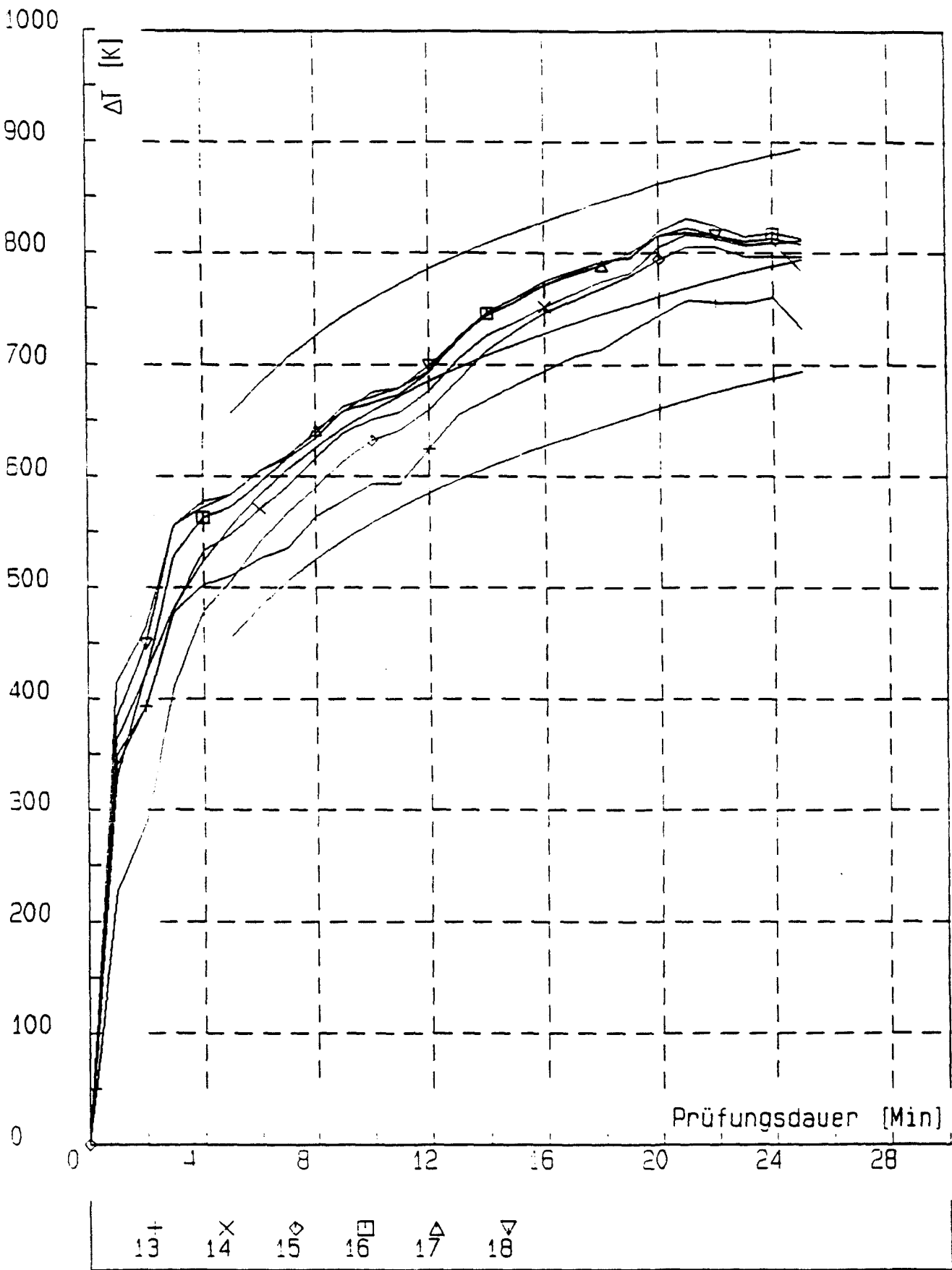
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS7



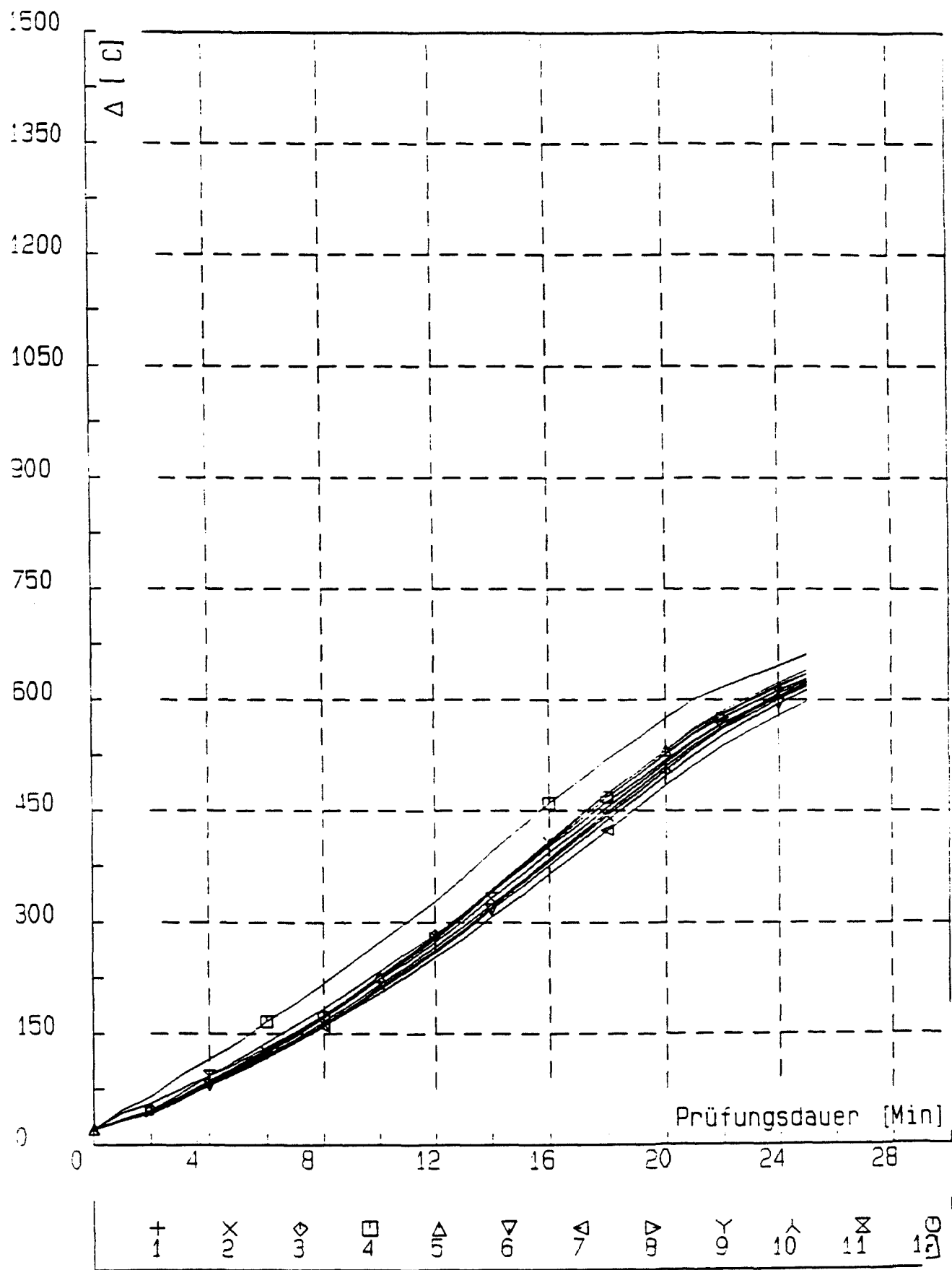
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze BS8



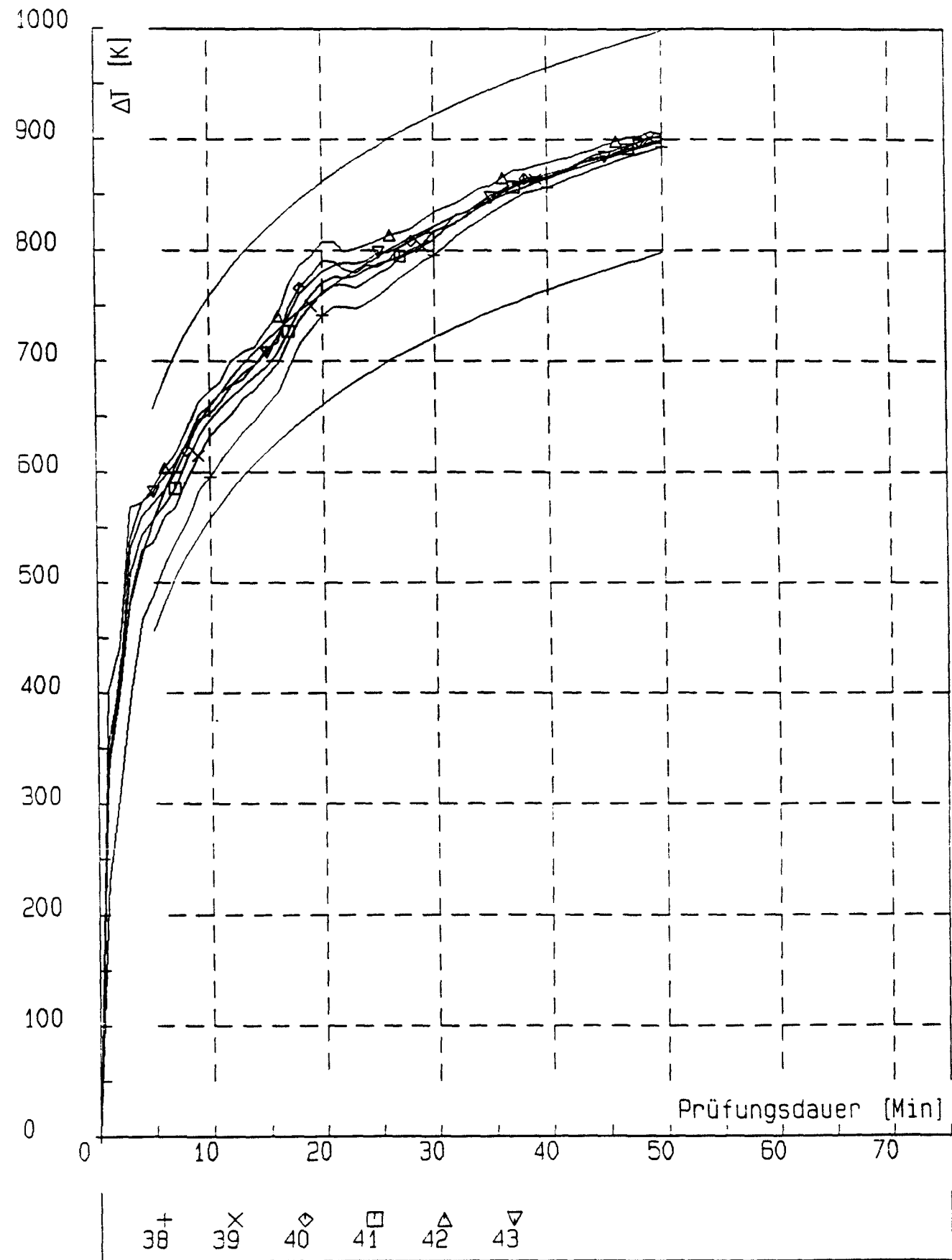
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze BS8



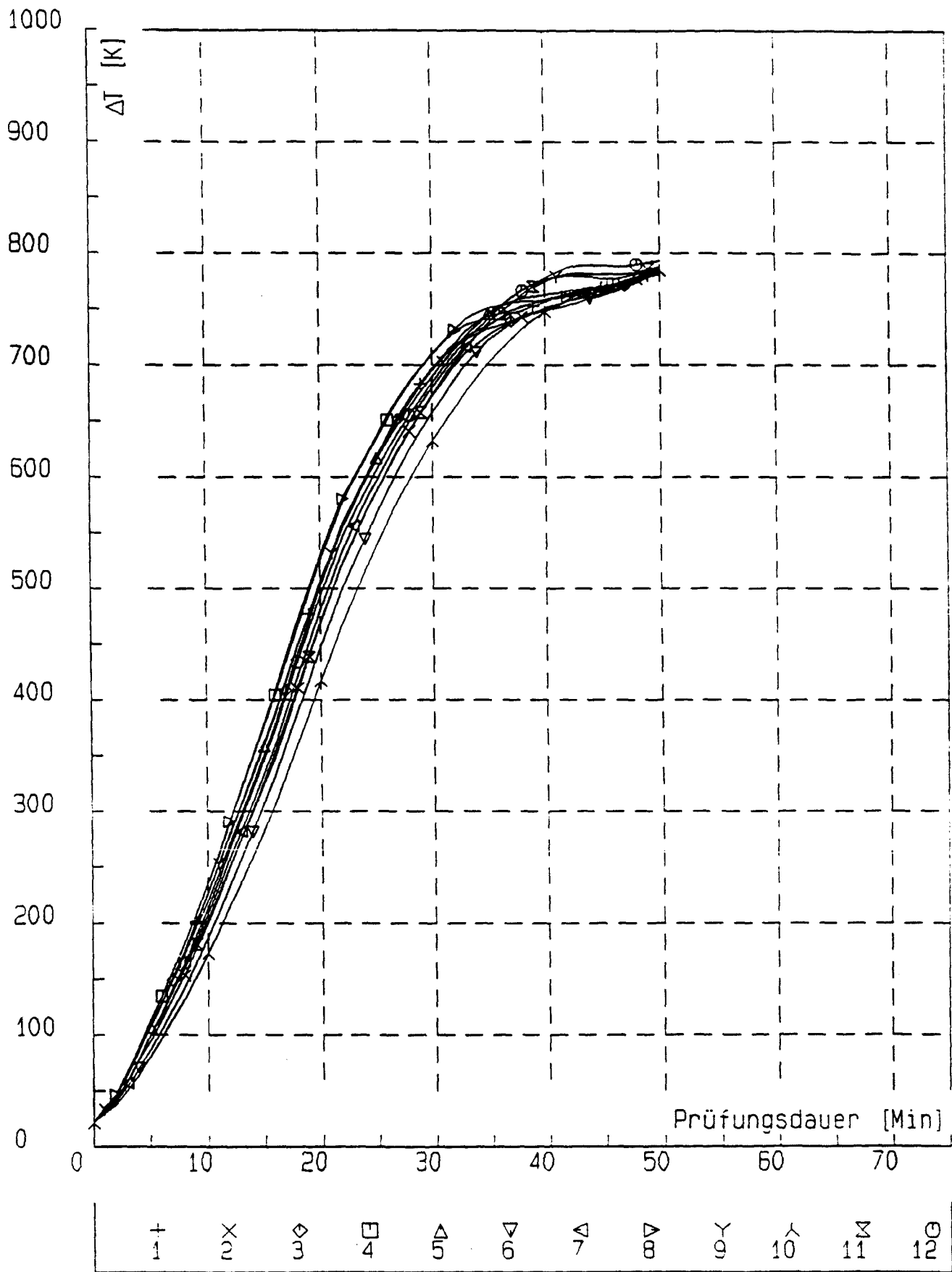
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze P4



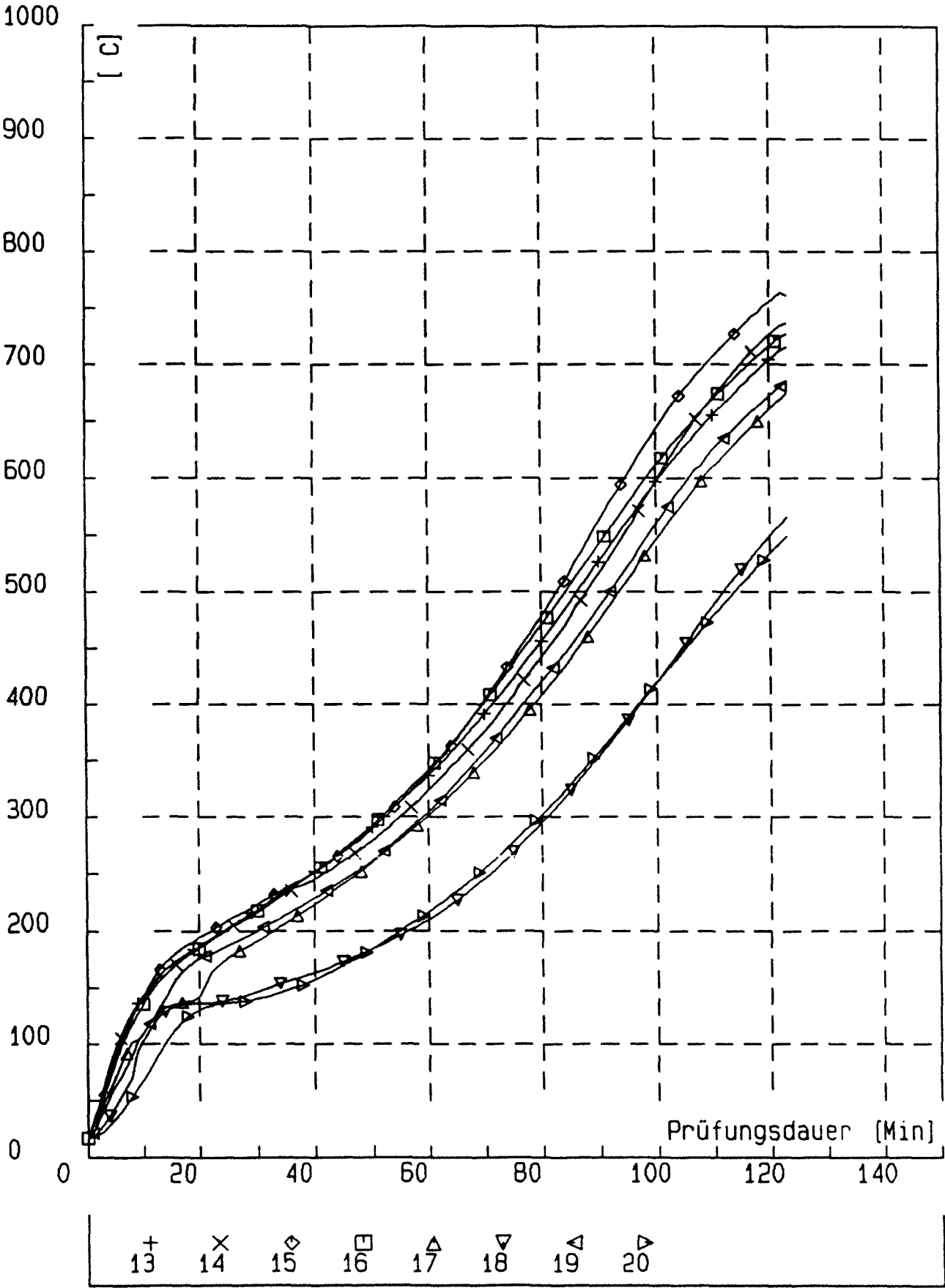
Oberflächentemperaturen Versuchsstütze P4



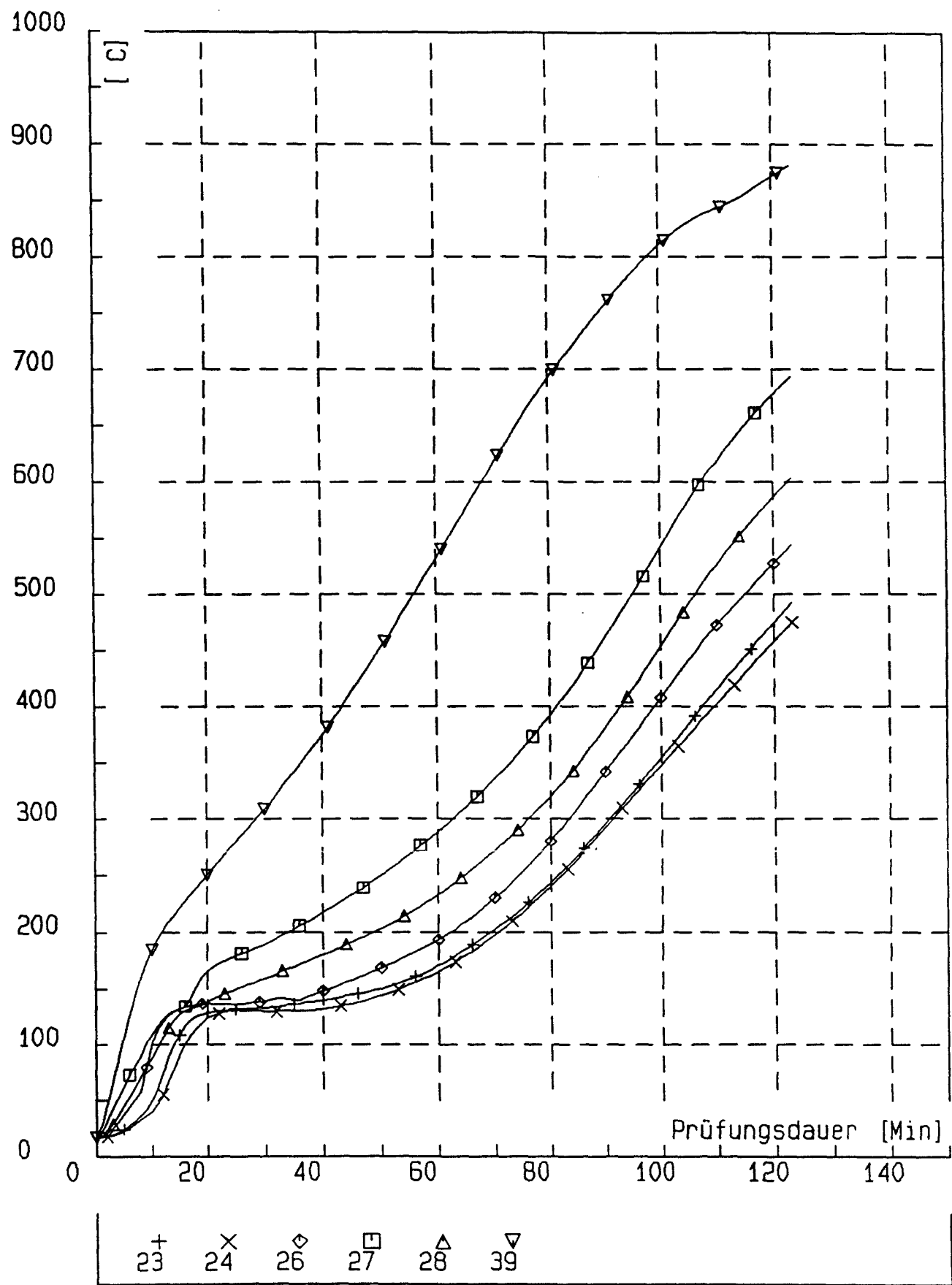
Brandraumtemperaturen, Versuchsstütze P17



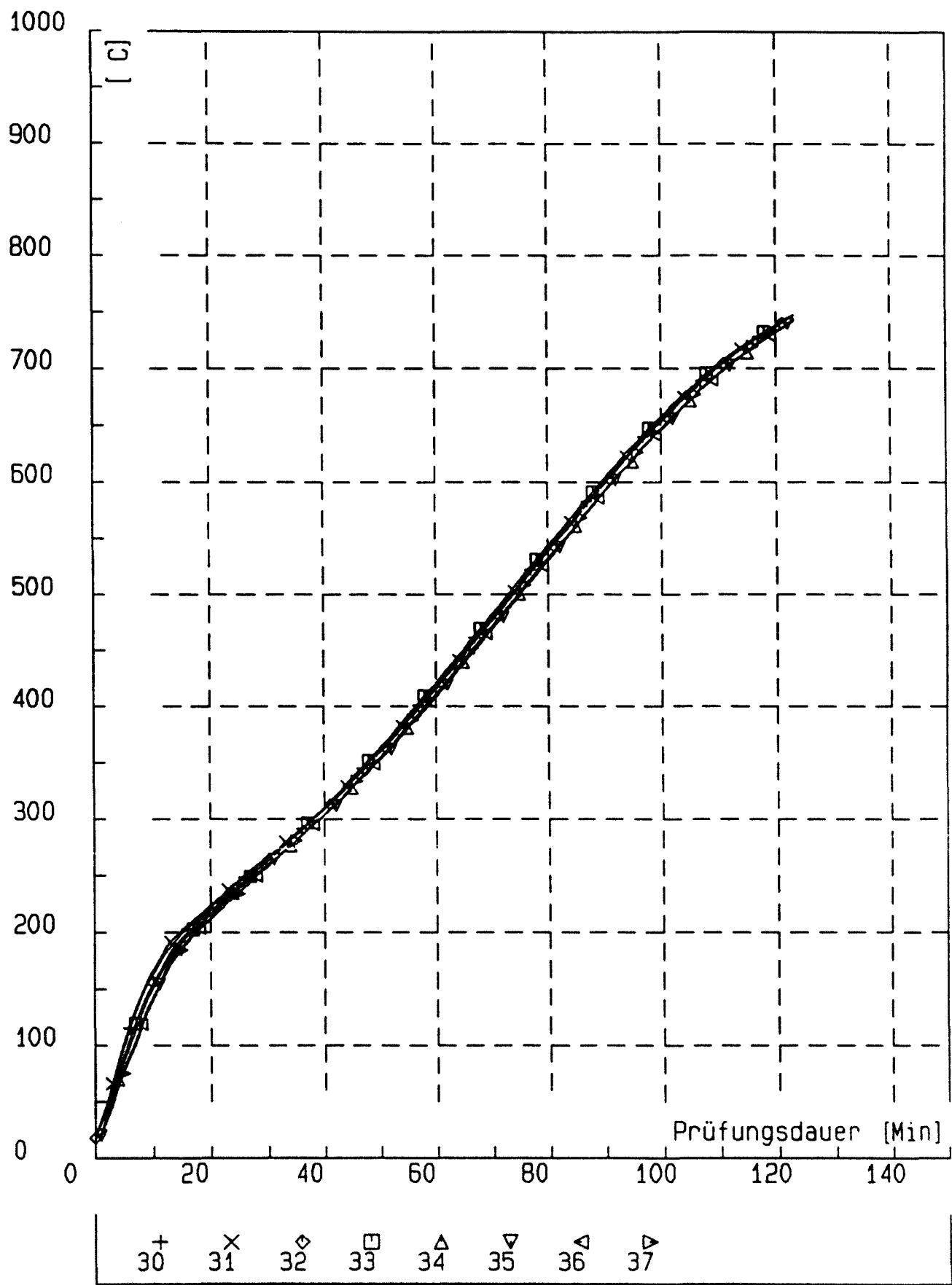
Oberflächentemperaturen, Versuchsstütze P17



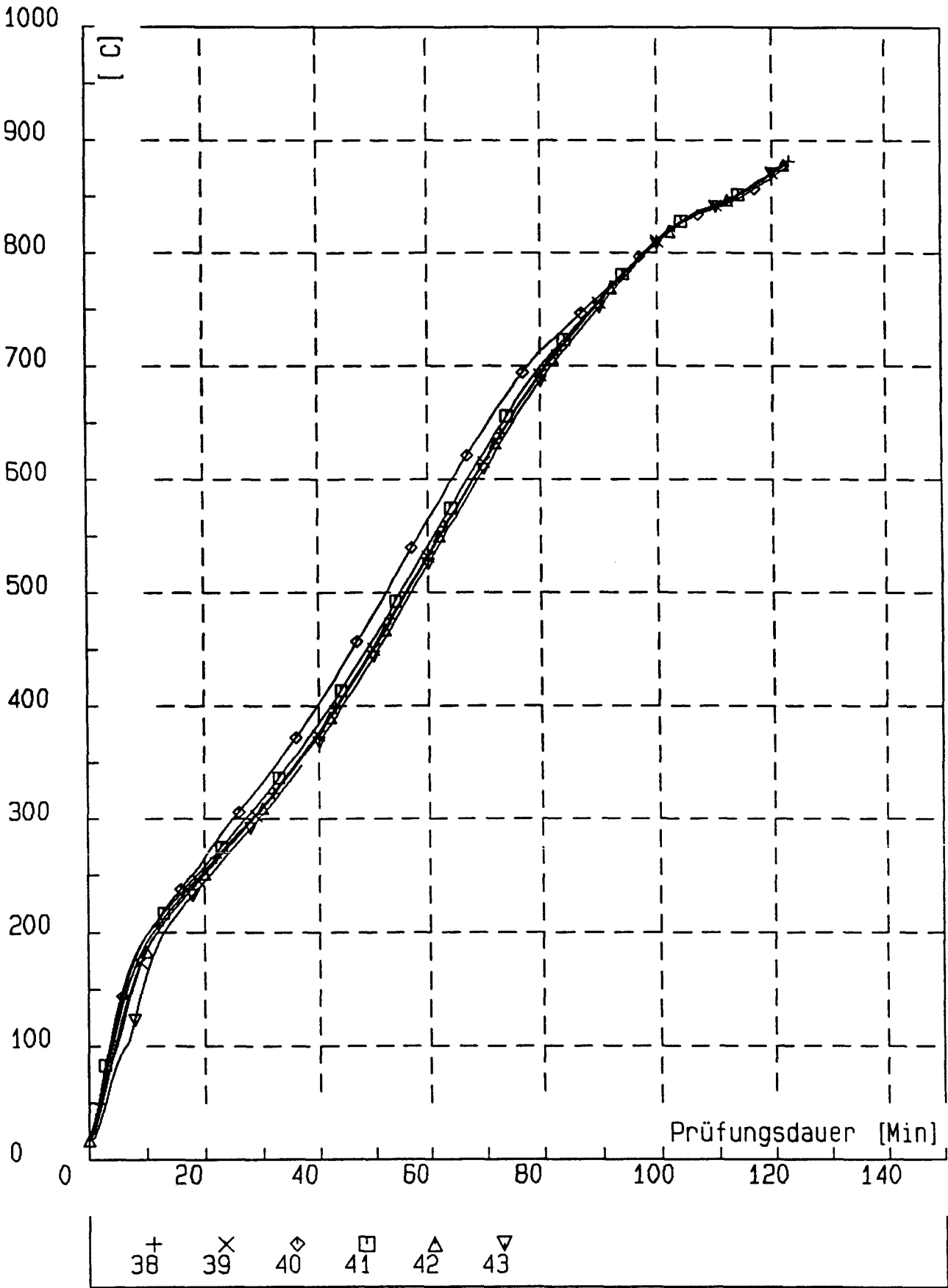
Oberflächentemperaturen, Stützenstummel St1



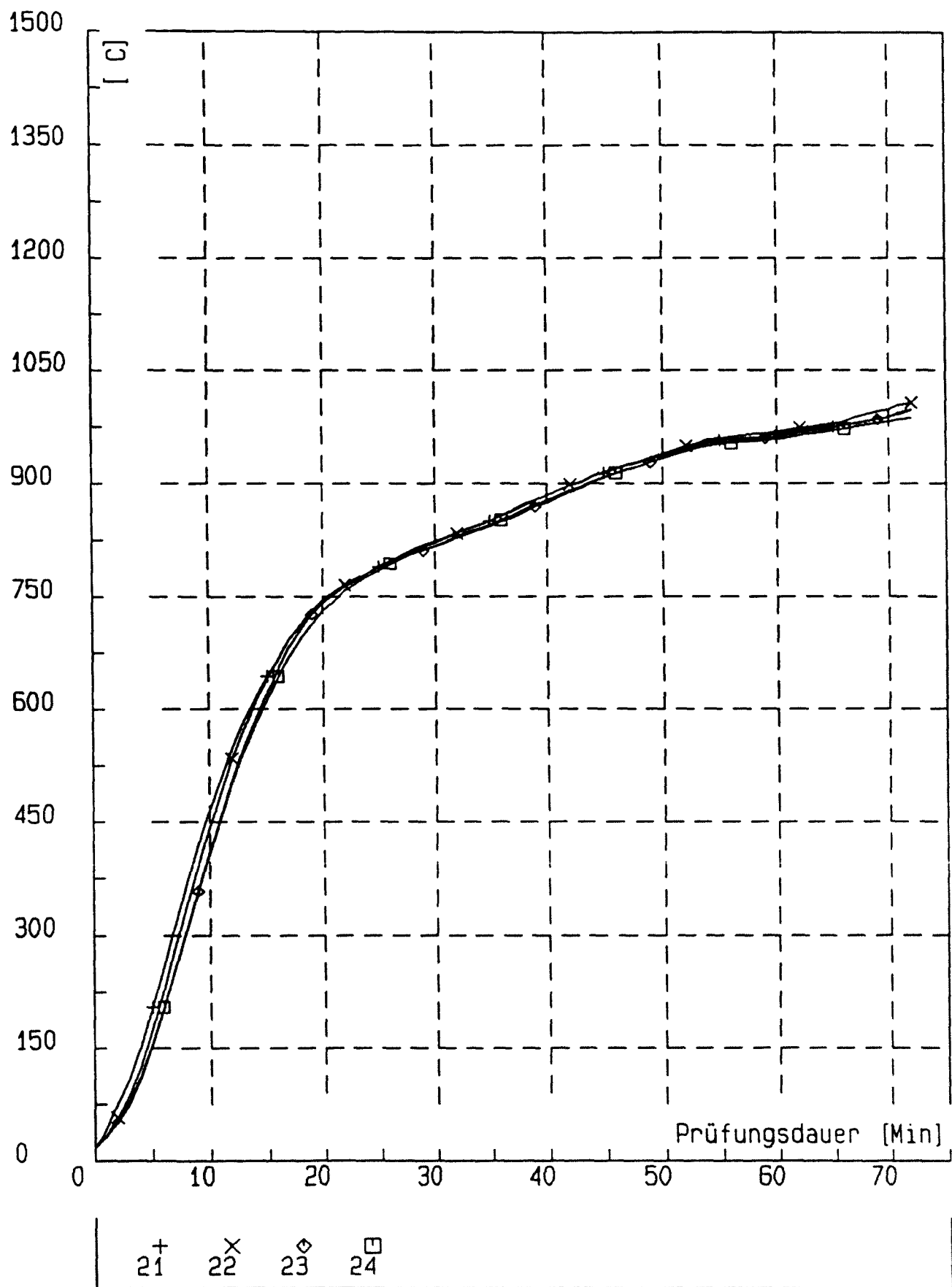
Oberflächentemperaturen, Stützenstummel St1



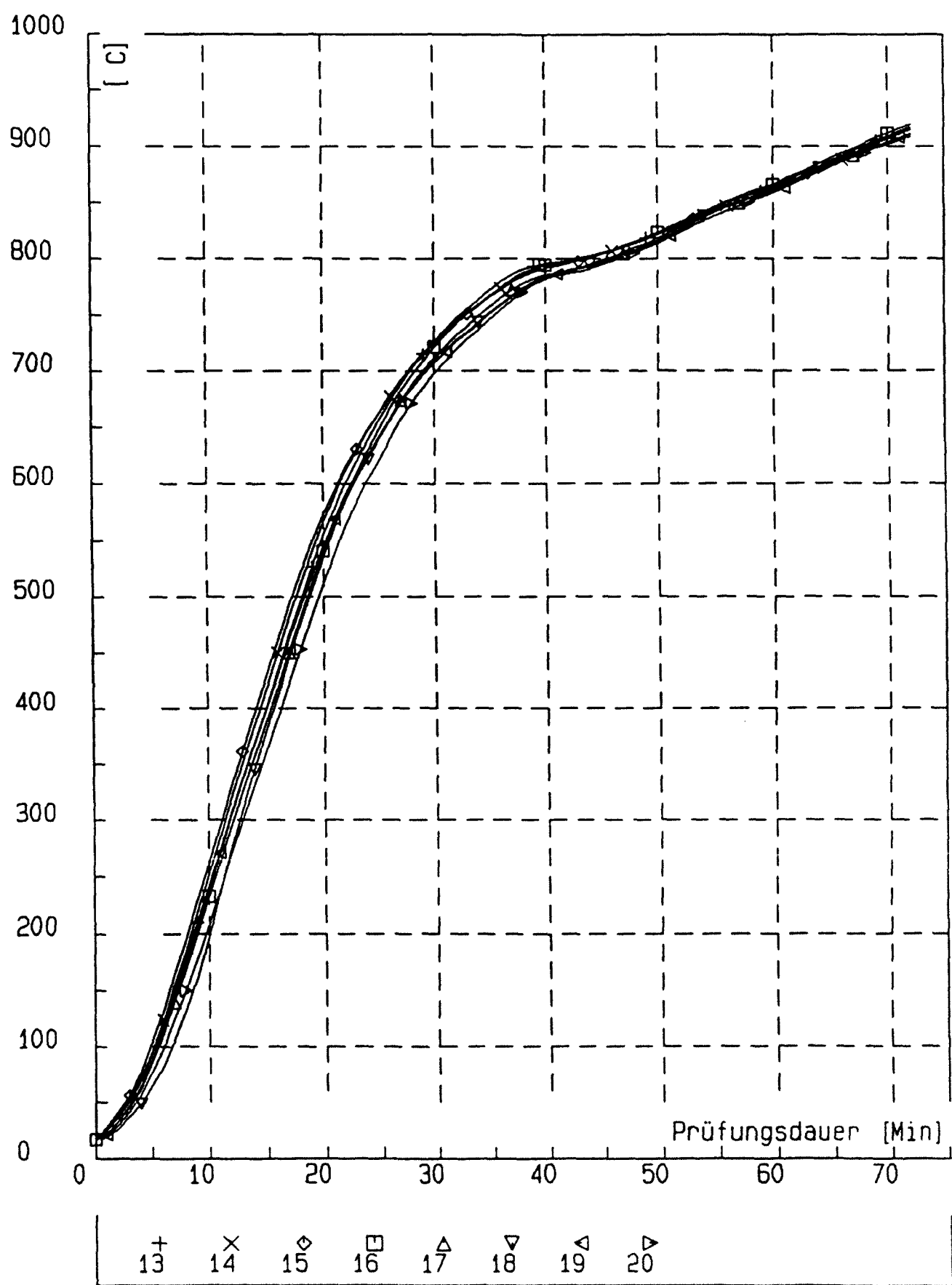
Oberflächentemperaturen, Stützenstummel St2



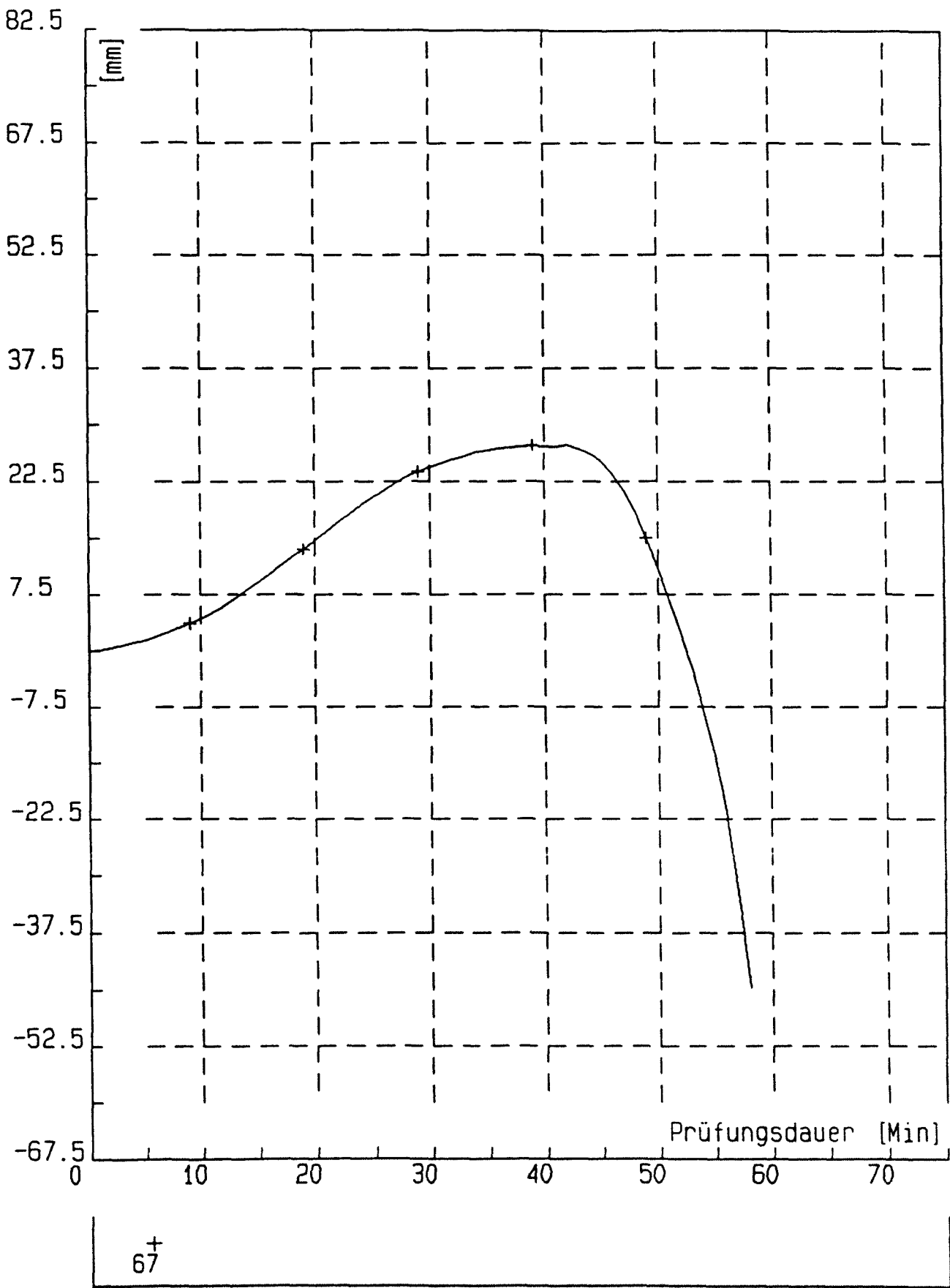
oberflächentemperaturen, Stützenstummel St3



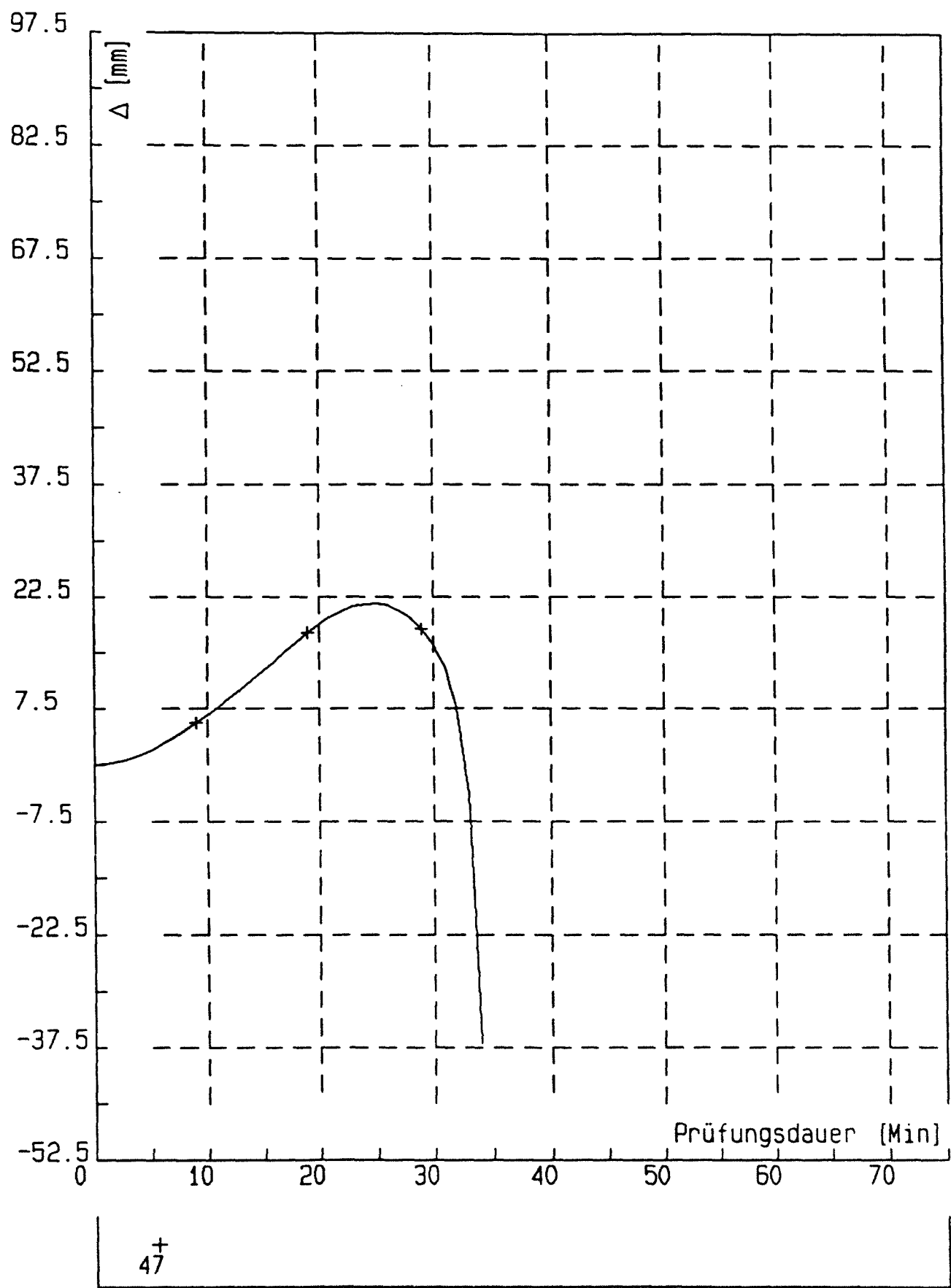
Oberflächentemperaturen, Stützenstummel St4



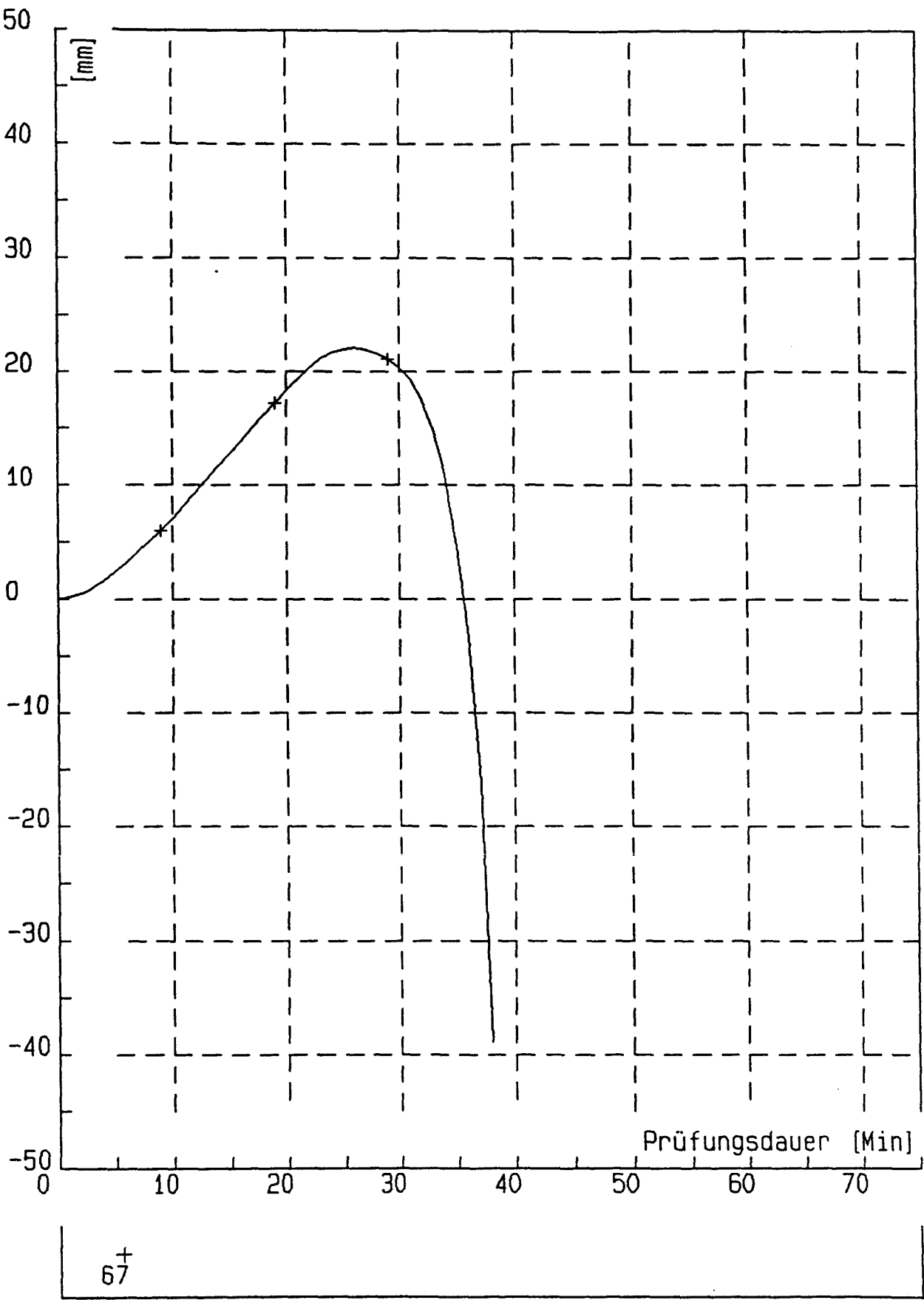
Oberflächentemperaturen, Stützenstummel St5



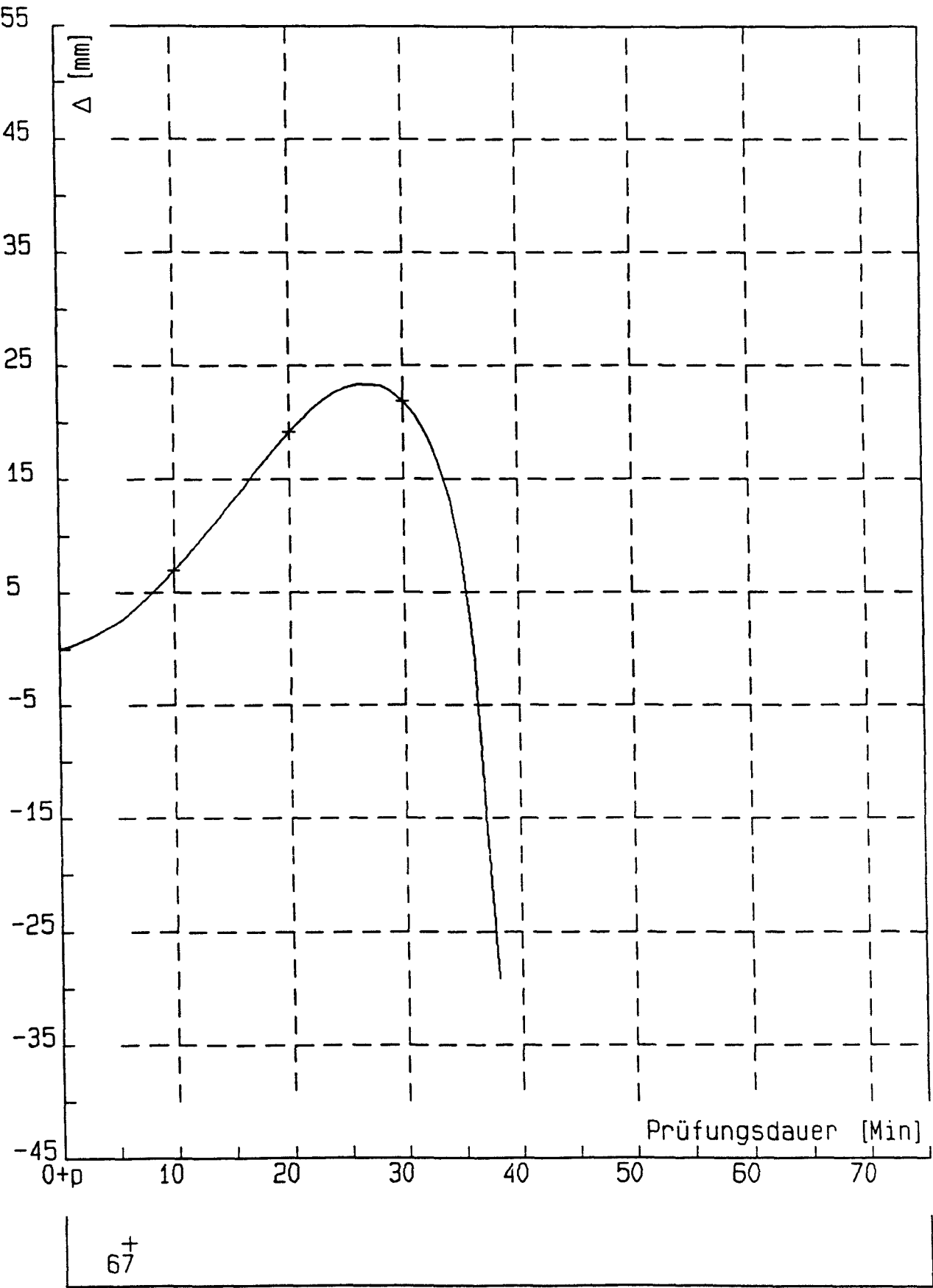
Verformungen, Versuchsstütze BS1



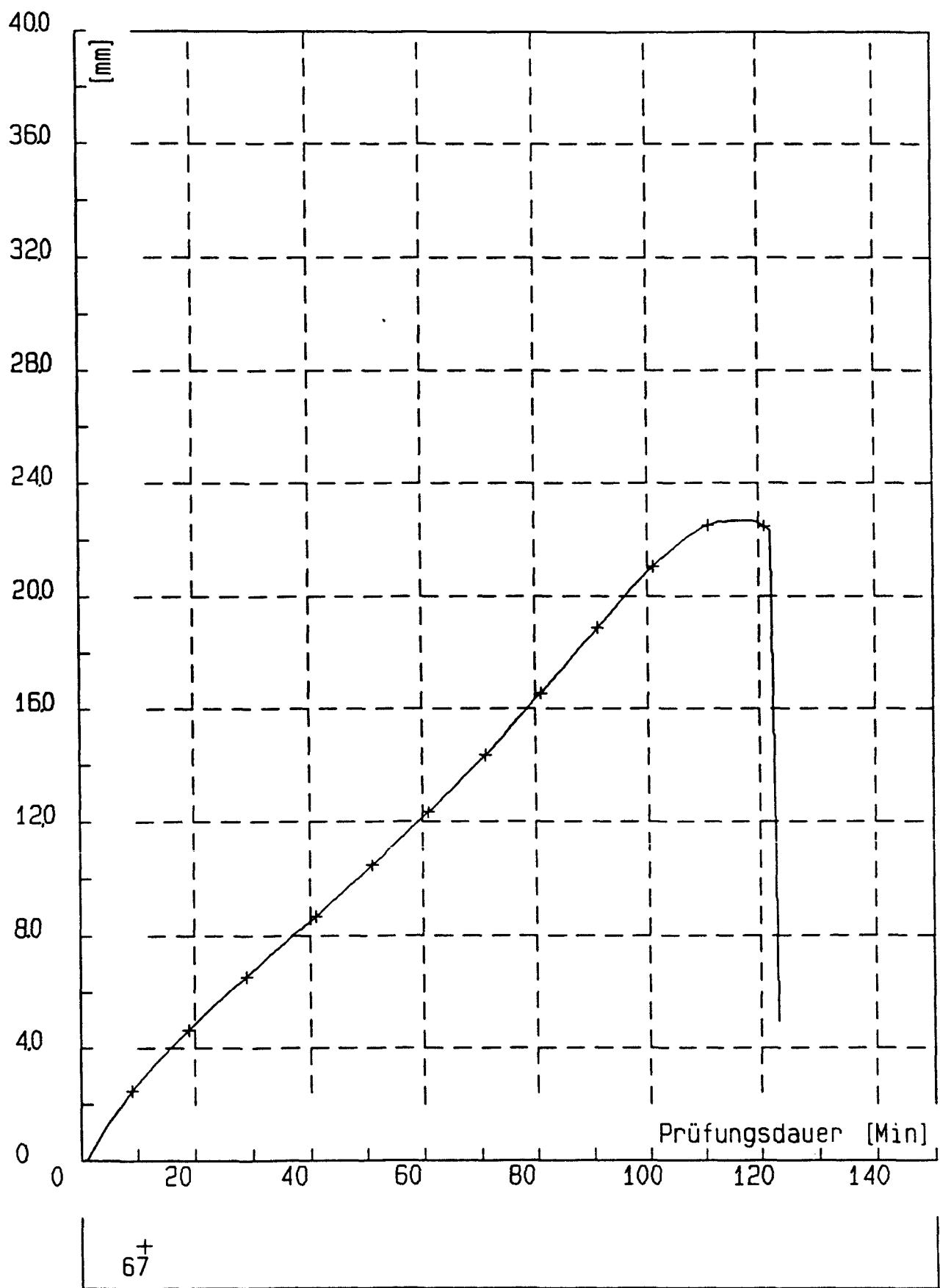
Verformungen, Versuchsstütze BS2



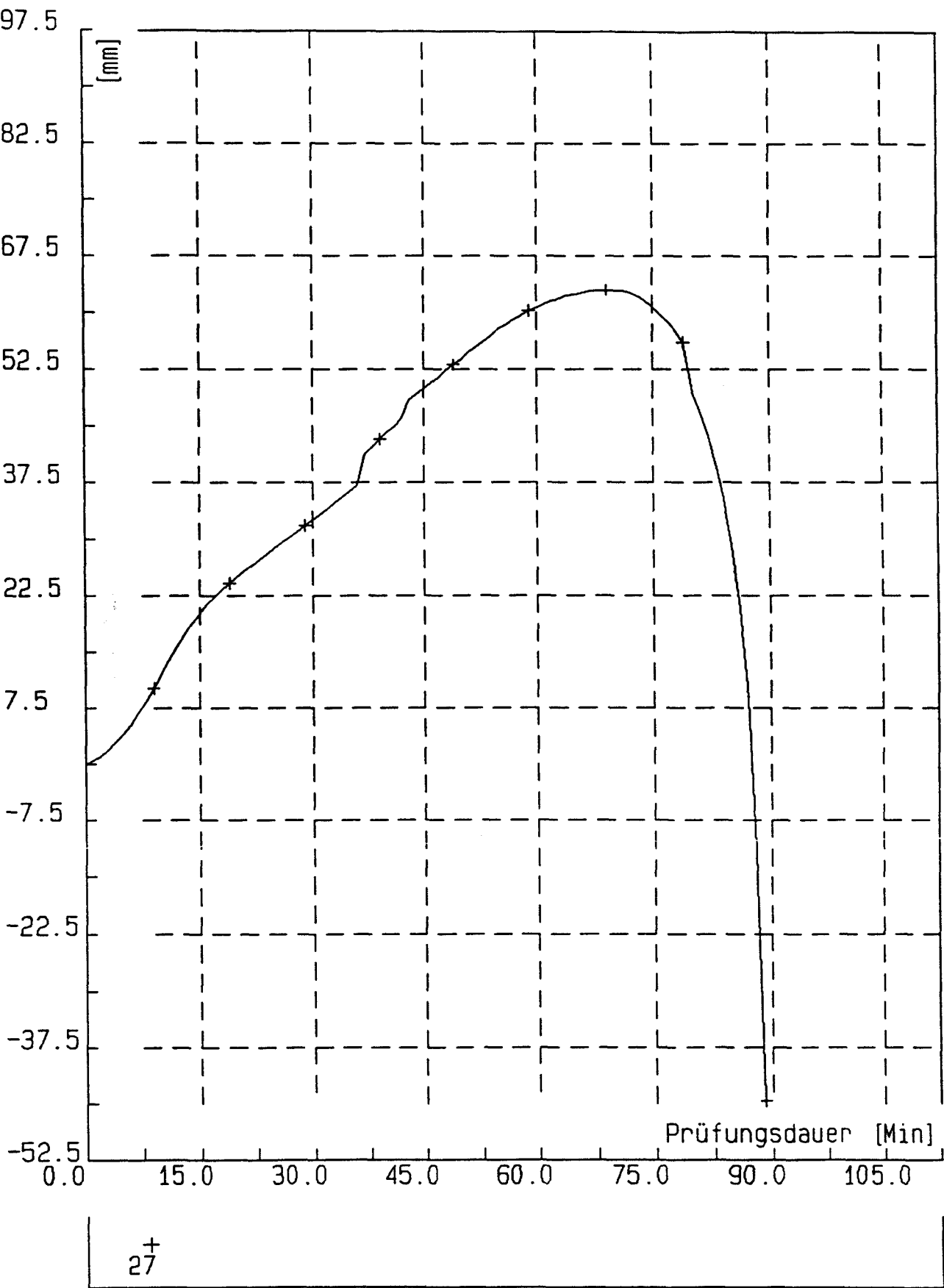
Verformungen, Versuchsstütze BS3



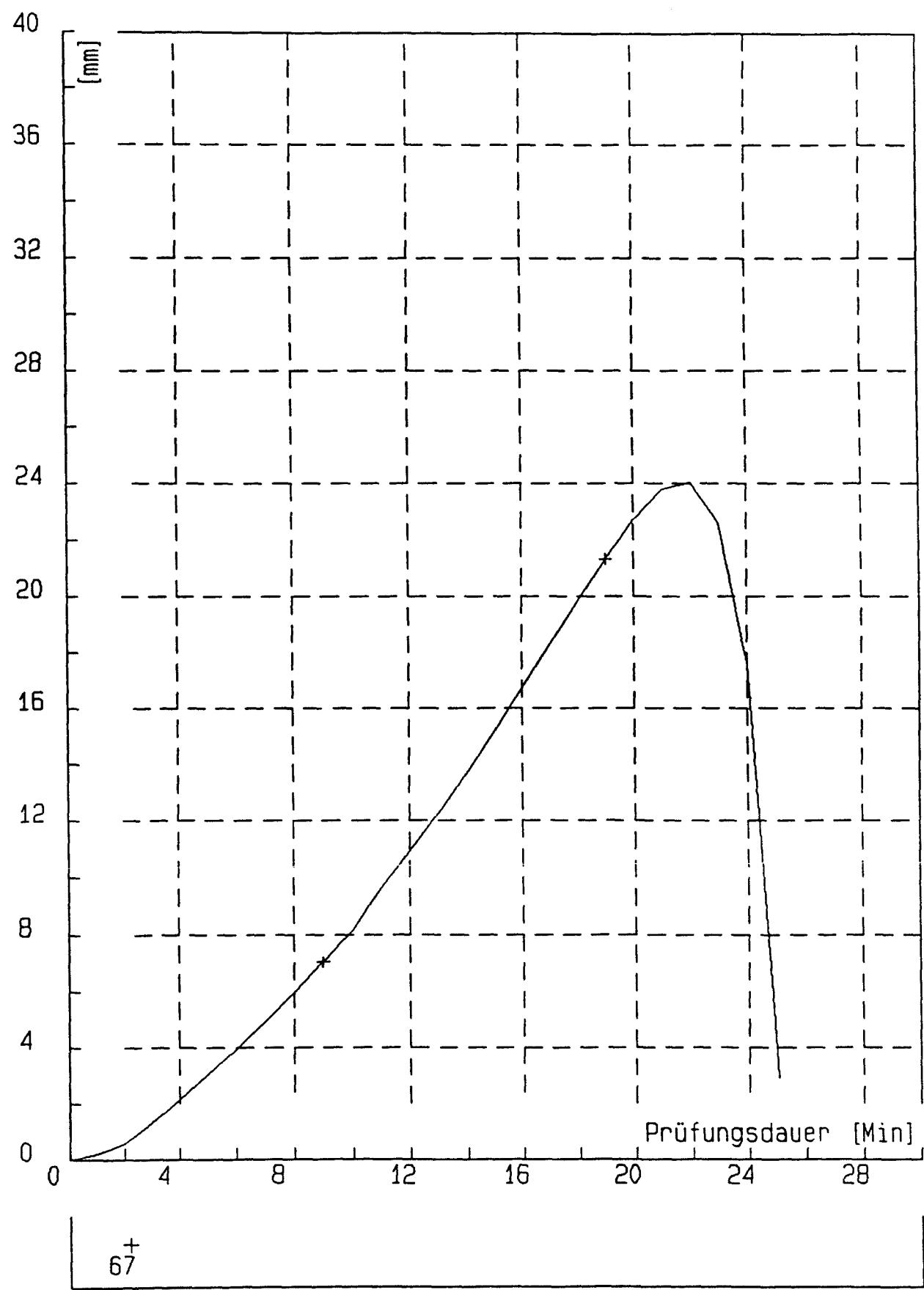
Verformungen, Versuchsstütze BS6



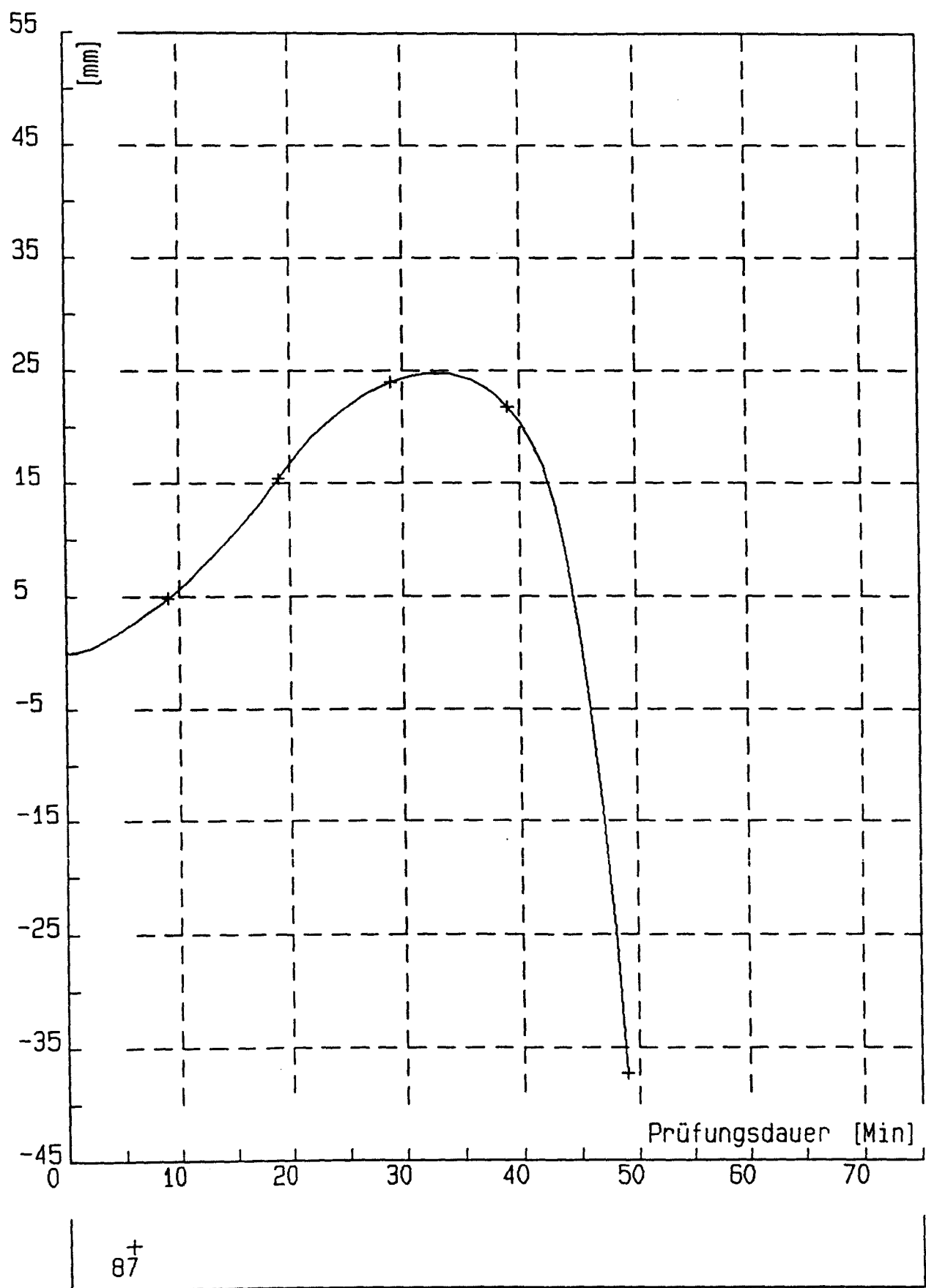
Verformungen, Versuchsstütze BS7



Verformungen, Versuchsstütze BS8



Verformungen, Versuchsstütze P4



Verformungen, Versuchsstütze P17

